

Desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos

Ângelo Huang

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Joaquim Gabriel Magalhães Mendes

Coorientador na FEUP: Prof. Bárbara Rangel Carvalho

Coorientador na FEUP: Prof. Carlos Manuel Ramos Moutinho



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Automação

setembro de 2018

“Do not go where the path may lead, go instead where there is no path and leave a trail”

Ralph Waldo Emerson

Resumo

O estudo e análise de vibrações em estruturas é, hoje em dia, umas das etapas mais importantes no seu desenvolvimento. Recorrendo a soluções tecnológicas que permitam realizar tais estudos, através da simulação de modelos sísmicos de tamanho reduzido ou até mesmo modelos em escala real.

Pretende-se com a realização deste trabalho, o desenvolvimento de uma plataforma sísmica uniaxial que sirva os propósitos de simulação para modelos sísmicos de escala reduzida, podendo este ser levado para as aulas para demonstração. Para esse fim, a plataforma deverá ser o mais leve e compacta possível e apresentar um custo relativamente reduzido. Para além disso, a solução proposta deverá ser capaz de realizar as diversas simulações com o maior rigor possível.

Atendo às necessidades anteriormente referidas, desenvolveu-se uma solução composta por elementos estruturais, uma placa de aquisição de dados, um transdutor de deslocamento, dois acelerómetros, um fuso de esferas, um motor DC e um *driver*.

Para o desenvolvimento do controlo do sistema, optou-se por uma placa de aquisição de dados em conjunto com o software *LabVIEW 2017*. O utilizador pode escolher através da interface o tipo de onda a ser executada no simulador (onda sinusoidal ou onda sísmica real), definindo posteriormente os parâmetros que a caracterizam (frequência, amplitude, fase, etc.). Para além disso, é possibilitado ao utilizador a visualização gráfica do comportamento da plataforma sísmica em tempo real.

O movimento realizado pela plataforma sísmica foi avaliado experimentalmente, tendo-se obtido valores bastante satisfatórios.

Para além do desenvolvimento da plataforma, foi concebido um modelo em *Solidworks* de forma a realizar uma análise comportamental de um modelo simplificado da estrutura.

Palavras chave: Plataforma sísmica, modelo sísmico, simulação sísmica

Development of a seismic simulation platform for small models demonstration

Abstract

Nowadays, the study and analysis of vibrations in structures is one of the most important stages in its development. Using technological solutions that allow to carry out such studies, through the simulation of seismic models of reduced size or even models in real scale.

The aim of this work is the development of an uniaxial seismic platform that serves the simulation purposes for small-scale seismic models, which can be taken to classes for demonstration. To this end, the platform should be as light and compact as possible and present a relatively low cost. In addition, the proposed solution should be able to perform the various simulations as rigorously as possible.

A solution composed of structural elements, a data acquisition board, a displacement transducer, accelerometers, a ball screw, a DC motor and a driver has been developed.

For the development of the system's control, a data acquisition board was chosen in conjunction with the software *LabVIEW 2017*. The user can choose on the interface the wave type to be executed in the simulator (sinusoidal wave or real seismic wave), defining parameters (frequency, amplitude, phase, etc.). In addition, the user is able to visualize the behavior of the seismic platform in real time.

The movement performed by the platform was evaluated experimentally, with very satisfactory values.

In addition to the development of the seismic platform, a SolidWorks model was designed to perform a behavioral analysis of a simplified structure model.

Keyword: seismic platform, seismic models, seismic simulation

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus orientadores, Professor Joaquim Gabriel, Professor Carlos Moutinho e Professora Bárbara Rangel, pelo tempo e recursos disponibilizados, pelo conhecimento ao longo da realização deste trabalho e pela oportunidade que me concederam em desenvolver este projeto.

Ao Professor Carlos Manuel de Sousa Moreira da Silva pela ajuda no desenho de algumas peças de suporte da mesa.

Ao Professor Fernando Gomes de Almeida pela ajuda nas questões de controlo.

Ao Sr. Joaquim Silva e Sr. António Ramalho pela permanente ajuda e disponibilidade, transmissão de conhecimentos, amizade e boa disposição durante a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de laboratório, em especial o João, César, Tenreiro e Daniel Silva pela ajuda e companhia.

À minha mãe, pela ajuda e sacrifício, que me permitiram chegar a este ponto.

Ao meu irmão pelo incentivo e apoio prestado ao longo deste trabalho.

A todas amizades que levo do BEST.

A todos meus amigos de civil, por estarem sempre prontos a ajudar e à distância de uma chamada.

Por último, mas não menos importante, a todas as pessoas cujas as ações, direta ou indiretamente, me ajudaram a concluir esta dissertação.

A todos, o meu sincero Obrigado!

Índice de Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2	Objetivos do projeto.....	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	2
2	Estado da Arte e Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	Tipos de soluções de acionamento.....	3
2.1.1	Sistema de biela manivela.....	3
2.1.2	Sistema hidráulico.....	4
2.1.3	Sistema pneumático.....	5
2.1.4	Sistema elétricos.....	6
2.2	Simuladores Sísmicos.....	7
2.2.1	Simulador Sísmico E-DEFENSE.....	7
2.2.2	Simulador Sísmico NEES.....	8
2.2.3	Simulador sísmico MTS.....	8
2.2.4	Simulador Sísmico da FEUP.....	9
2.3	Simulador de vibrações.....	10
2.3.1	EHST (electro-hydraulic shaking table) Xuzhou University.....	10
2.3.2	Quanser Shake Table III.....	11
2.3.3	Simulador Multiaxial da FEUP.....	12
2.3.4	Simulador Universidade Valladolid.....	13
3	Projeto do simulador uniaxial.....	15
3.1	Requisitos e especificações do sistema.....	15
3.2	Arquitetura do sistema.....	15
3.3	Estrutura do simulador uniaxial.....	16
3.4	Fuso de esferas.....	18
3.5	Circuito elétrico.....	20
3.5.1	Motor passo a passo.....	20
3.5.2	Driver do motor passo a passo.....	24
3.5.3	Verificação das especificações do sistema.....	24
3.5.4	Motor DC.....	26
3.5.5	Driver do motor DC.....	28
3.5.6	Software.....	29
3.5.7	Placa de aquisição de dados.....	29
3.5.8	Fonte de alimentação.....	30
3.5.9	Acelerómetro.....	31
3.5.10	Sensor de deslocamento.....	32
3.5.11	Sensores fim de curso.....	32
4	Desenvolvimento do <i>software</i>	33
4.1	Caracterização dos sensores.....	33
4.1.1	Transdutor potenciométrico.....	33
4.1.2	Acelerómetro.....	35
4.2	<i>Software</i> e interface gráfica.....	35
4.2.1	Interface gráfica e de controlo.....	35
5	Análise do modelo sísmico.....	43
6	Análise e discussão de resultados.....	47

6.1	Desenho do controlador	47
6.2	Resposta a uma onda sinusoidal.....	48
6.3	Resposta a uma onda sísmica real	55
6.4	Limites de funcionamento.....	56
7	Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	59
7.1	Conclusões	59
7.2	Trabalhos Futuros.....	60
	Referências	61
ANEXO A:	Especificações da carruagem do fuso de esferas	65
ANEXO B:	Esquemas Elétricos.....	67
ANEXO C:	Especificações do motor elétrico	71
ANEXO D:	Software LabVIEW	73
ANEXO E:	Desenho de definição do suporte do modelo	81
ANEXO F:	Exercícios propostos	83

Índice de Figuras

Figura 2.1- Modelo CAD 3D do mecanismo de biela manivela [5].....	3
Figura 2.2- Esquema sistema de excitação com o mecanismo de biela manivela [6].	4
Figura 2.3- Simulador sísmico hidráulico I. I. T. Kanpur [8].....	4
Figura 2.4- Esquema de sistema hidráulico [7].	5
Figura 2.5- Simulador pneumático [9].	5
Figura 2.6- Esquema do circuito pneumático [9].	6
Figura 2.7- Simulador Quanser Shake Table II [10].	6
Figura 2.8- Simulador sísmico E-DEFENSE [11].	7
Figura 2.9- Simulador sísmico NEES [12].....	8
Figura 2.10- Simulador sísmico MTS 1.5 m e 3.0 m [13].....	9
Figura 2.11- Simulador sísmico do DEC.	9
Figura 2.12-Simulador de vibrações EHST [15].....	10
Figura 2.13- Simulador Quanser Shake Table III [10].	11
Figura 2.14- Diagrama esquemático da mesa vibratória [16].	12
Figura 2.15- Simulador Multiaxial FEUP.	12
Figura 2.16- Simulador Universidade Valladolid [17].....	13
Figura 2.17- Placa de aquisição de dados, SIRIUS [17].	13
Figura 3.1- Esquema da arquitetura do sistema.....	16
Figura 3.2- Estrutura e componentes constituintes do simulador uniaxial.....	17
Figura 3.3- Tampo do simulador uniaxial.	17
Figura 3.4- Fuso de esferas com flange [18].	18
Figura 3.5- Carruagem do fuso de esferas, modelo MGD [18].....	18
Figura 3.6- Configuração típica de um sistema com o motor passo a passo [21].	21
Figura 3.7- Configuração para os enrolamentos do motor passo a passo [21].....	22
Figura 3.8- Ligação unipolar e bipolar [21].	22
Figura 3.9- Curva característica do motor passo a passo [22].....	23
Figura 3.10 - Especificações do motor passo a passo serie PK296D45BA [22].....	23
Figura 3.11- Driver do motor passo a passo, <i>PoStep60</i> [23].....	24
Figura 3.12- Referência de posição da mesa em função do tempo.	25
Figura 3.13- Driver do motor passo a passo, modelo L298 [24].....	26
Figura 3.14- Esquema do motor DC com escovas [21].....	27
Figura 3.15- Curva característica do motor DC [25].....	27
Figura 3.16 - Driver do motor DC, DRI0042 [25].	28
Figura 3.17- Placa <i>NI PCI-6221</i> [27].	29
Figura 3.18- Modulo de ligação <i>NI SCB-68</i> [29].	30

Figura 3.19- Fonte de alimentação, S-150-24 [30].	31
Figura 3.20- Acelerómetro, ADXL 103 [31].	31
Figura 3.21- Acelerómetro, LIS3L06AL [32].	31
Figura 3.22- Transdutor potenciométrico, GEFran PZ34 – S – 125 [33].	32
Figura 3.23- Sensor fim de curso	32
Figura 4.1- Esquema elétrico de um filtro passa-baixo [34].	34
Figura 4.2- Diagrama de Bode do filtro [34].	34
Figura 4.3- Visão geral do comportamento do sistema.	35
Figura 4.4- Página inicial da interface do utilizador desenvolvida.	36
Figura 4.5- Janela do <i>Set Point</i> .	37
Figura 4.6- Janela do menu <i>Simulation</i> .	38
Figura 4.7- Diagrama de blocos do menu de navegação.	38
Figura 4.8- Parte do diagrama de blocos do <i>case structure</i> responsável pelo <i>Set Point</i> .	39
Figura 4.9- Parte do diagrama de blocos do <i>case structure</i> responsável pelo <i>Simulation</i> .	39
Figura 4.10- Grafset comportamental da interface.	40
Figura 4.11- Bloco funcional de exportação de dados.	41
Figura 4.12- Diagrama de blocos do gerador de funções	41
Figura 5.1- Modelo sísmico utilizado.	43
Figura 5.2- Suporte do modelo.	43
Figura 5.3- Modelo simplificado da estrutura [1].	44
Figura 5.4- Simulação dos modos de vibração do modelo sísmico.	45
Figura 6.1- Esquema do diagrama de blocos.	47
Figura 6.2- Representação gráfica da resposta da mesa com o controlador P e PI.	48
Figura 6.3- Resposta da mesa para um sismo real sem o <i>offset</i> de referência.	55
Figura 6.4- Resposta da mesa para um sismo real com o <i>offset</i> da referência.	56
Figura 6.5- Resposta máxima em amplitude do sistema para várias frequências.	56
Figura 6.6- Simulação do modelo sísmico a 1,3 Hz.	57

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Características do simulador E-DEFENSE [11]	7
Tabela 2.2- Características do simulador NEES [12].....	8
Tabela 2.3- Características do simulador MTS 3.0 m [13]	9
Tabela 2.4- Características do simulador sísmico DEC	10
Tabela 2.5- Características do simulador de vibrações EHST [15].....	11
Tabela 2.6- Características do simulador de vibrações Quanser Shake Table III [10]	11
Tabela 2.7- Características do simulador Multiaxial FEUP	12
Tabela 2.8- Características do simulador Universidade Valladolid [17].....	13
Tabela 3.1- Características principais do fuso de esferas [18]	18
Tabela 3.2- Propriedades do Driver, DRI0042 [25]	28
Tabela 3.3- Propriedades da placa <i>NI PCI-6221</i> [28].	30
Tabela 3.4- Especificações da fonte de alimentação, <i>S-150-24</i> [30].....	31
Tabela 3.5- Especificações do acelerómetro ADXL103 [31].....	31
Tabela 3.6- Especificações do acelerómetro LIS3L06AL [32]	31
Tabela 3.7- Especificações do transdutor [33]	32
Tabela 6.1- Valores de ajuste do segundo método de Ziegler–Nichols	48
Tabela 6.2- Resposta da mesa para uma simulação de 1 Hz	49
Tabela 6.3- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 1 Hz.....	50
Tabela 6.4 - Resposta da mesa para uma simulação de 2 Hz	50
Tabela 6.5- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 2 Hz.....	51
Tabela 6.6- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 3 Hz.....	51
Tabela 6.7- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 3 Hz.....	52
Tabela 6.8- Resposta da mesa para uma simulação de 4 Hz	52
Tabela 6.9 - Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 4 Hz.....	53
Tabela 6.10- Resposta da mesa para uma simulação de 5 Hz	53
Tabela 6.11- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 5 Hz.....	54
Tabela 6.12- Resposta da mesa com <i>offset</i>	54
Tabela 6.13- Características dinâmicas máximas do simulador uniaxial.	57

Lista de símbolos

- a_{max} – Valor da aceleração máxima da plataforma [g]
 a_1 – Valor de aceleração do acelerómetro 1 [g]
 a_2 – Valor de aceleração do acelerómetro 2 [g]
 b – Comprimento da base da secção da barra de alumínio [m]
 E – Módulo de Young [Pa]
 M_{ta} – Momento torsor aplicável [Nm]
 F – Força desenvolvida pelo fuso [N]
 f – Frequência [Hz]
 h – Espessura da barra de alumínio [m]
 I_y – Momento de inércia [m⁴]
 k_{eq} – Rigidez equivalente da estrutura
 L – Comprimento da barra de alumínio [m]
 m_{bola} – Massa da bola [kg]
 m_{eq} – Massa equivalente da estrutura [kg]
 $m_{estrutura}$ – massa da estrutura [kg]
 m_{mesa} – massa da mesa [kg]
 n – Velocidade de rotação [rotação/s]
 P – Passo do fuso [mm]
 V – Velocidade linear [mm/s]
 V – Tensão de saída do transdutor [V]
 x – Posição do transdutor [mm]
 Δt – Intervalo de tempo [s]
 ΔY – Distância a percorrer [mm]
 η – Rendimento mecânico
 ρ – Massa volúmica [kg/m³]
 Φ_{bola} – Diâmetro da bola [m]
 ω_n – Frequência natural [rad/s]
 $\dot{\omega}_{max}$ – Aceleração angular máxima [rad/s²]

1 Introdução

Este capítulo apresenta o tema do trabalho realizado que consiste no desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos, o respetivo enquadramento e os objetivos bem como a estrutura deste documento.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O funcionamento de máquinas é sempre acompanhado de vibrações, provocadas pelas solicitações dinâmicas aplicadas. Na maioria destes casos a vibração conduz a efeitos indesejáveis tais como amplitudes de movimento que excedem as previstas no projeto e que podem prejudicar o bom desempenho do equipamento, atingirem-se frequências em que a máquina ou a estrutura entre em ressonância dando origem a elevadas deformações ou tensões que possam levar à sua rotura, desgaste excessivo e prematuro, fadiga de componentes e ainda situações de instabilidade dinâmica que podem inclusivamente provocar o colapso e reduzem drasticamente o ciclo de vida dos seus componentes.

No entanto, existem também situações onde a vibração é essencial para o bom funcionamento do equipamento, como por exemplo, compactadores, banhos ultrassónicos, martelos pneumáticos, instrumentos musicais e equipamentos de massagem [1].

Contudo, as vibrações não se fazem sentir apenas nos equipamentos mecânicos, mas também na própria natureza, causadas pelo deslizamento das placas tectónicas, dando origem ao fenómeno designado sismo. Alguns factos da história mostram que o movimento da superfície da Terra pode trazer efeitos desastrosos. De entre as catástrofes com maior magnitude podemos destacar:

- Sismo de magnitude 9.5 na escala de Richter, no Chile, em 1960, onde entre 2 a 6 mil pessoas perderam a vida [2];
- Sismo de magnitude 9.2 na escala de Richter, na Indonésia, em 2004, na qual mais de 220 mil pessoas perderam as suas vidas [3];
- Sismo de magnitude 9 na escala de Richter, em Portugal, 1755, na qual se estipula entre os 10 mil a 30 mil mortos [4].

No intuito da prevenção dos efeitos causados pelos sismos, surgem os simuladores. Estes não são mais do que máquinas de testes e validação, para suporte ao estudo do efeito das vibrações em estruturas.

É neste enquadramento que surgiu a proposta para o projeto e construção de um simulador de vibrações uniaxial para pequenos modelos, com o objetivo essencialmente didático e de demonstração, capaz de reproduzir condições às quais os equipamentos ou estruturas estariam sujeitos durante o seu período de vida, cobrindo condições também compatíveis com sismos.

O projeto foi iniciado pelo estudante Jorge Manuel de Almeida, que desenhou e construiu a estrutura e o sistema de movimentação em 2015. Mais tarde em 2017/2018, foi criado o sistema de controlo e de comando pelos colegas Tiago Rodrigues, Gil Silva, Sébastien Joly e Manuel Sousa, na unidade curricular de Aplicações de Sistema Mecatrónicos. No entanto, devido às limitações eletrónicas existentes não foi possível cumprir com os requisitos pretendidos.

É nesta perspetiva que se insere o presente projeto: Desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos, proposto como tema de dissertação do curso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.2 Objetivos do projeto

O principal objetivo deste projeto é o Desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos.

Para a execução deste objetivo definiram-se as seguintes tarefas:

- Pesquisa bibliográfica dos diferentes tipos de soluções construtivas para simuladores sísmicos e simuladores de vibrações;
- Mudança do tipo de acionamento existente no projeto inicial;
- Implementação de sensores para um melhor controlo do simulador;
- Implementação de uma interface gráfica que seja prática, intuitiva e com geração de dados para uma melhor compreensão dos fenómenos associados às vibrações;
- Construção do modelo sísmico para os ensaios;
- Teste e caracterização do movimento do simulador e do modelo a ensaiar.

1.3 Estrutura da dissertação

Este documento está organizado em 7 capítulos, conforme descrito seguidamente.

Capítulo 1 – Introdução – no qual esta secção se insere, faz-se uma apresentação do tema da presente dissertação, motivação, enquadramento e os objetivos que se pretendem atingir.

Capítulo 2 – Estado de arte – apresenta-se uma pesquisa bibliográfica de soluções existentes no mercado ou em desenvolvimento, focando as suas principais características e princípios de funcionamento.

Capítulo 3 – Projeto do simulador uniaxial – são enunciados as especificações e requisitos do sistema, os componentes constituintes da arquitetura do sistema, bem como as alterações realizadas a alguns componentes do projeto.

Capítulo 4 – Desenvolvimento do *software* – é apresentada a interface gráfica que permitirá o controlo e interação do utilizador com a máquina e a lógica de controlo desenvolvida.

Capítulo 5 – Análise do modelo sísmico – descreve-se o material utilizado para a conceção da estrutura, sendo também apresentado uma análise comportamental da estrutura desenvolvida.

Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados – Apresentam-se os testes realizados ao simulador e à estrutura de ensaio, e os respetivos resultados, comparando o comportamento real com o comportamento previsto.

Por último, no capítulo 7 – Conclusões – apresentam-se as principais conclusões retiradas da elaboração deste trabalho, expondo também algumas considerações sobre trabalhos futuros a realizar sobre o sistema.

2 Estado da Arte e Revisão Bibliográfica

Um simulador sísmico é uma plataforma que permite testar o efeito das ondas sísmicas numa determinada estrutura. Assim, neste capítulo é realizado um estudo bibliográfico detalhado acerca das diferentes soluções tecnológicas existentes atualmente para um simulador sísmico. Como tal, é necessário ter em conta as diferentes soluções construtivas bem como as características dos equipamentos. Deste modo, será inicialmente realizada uma exposição quanto aos tipos de soluções construtivas existentes, salientando o modo de atuação utilizado. Posteriormente serão apresentados alguns exemplos reais de simuladores sísmicos e vibratórios bem como uma breve descrição das suas características.

2.1 Tipos de soluções de acionamento

Neste capítulo serão expostos os principais tipos de acionamentos existente para um simulador sísmico, referindo algumas das suas vantagens e limitações.

2.1.1 Sistema de biela manivela

Este tipo de sistema (figura 2.1) é constituído por:

- Uma mesa, onde será colocada a estrutura de teste;
- Um conjunto de rolamentos lineares, de modo a permitir o movimento da mesa segundo uma dada direção;
- Um sistema de biela manivela composto por um disco com ranhura, permitindo assim variar a amplitude do movimento e uma manivela que realiza a ligação entre o disco e a mesa. A biela encontra-se ligado ao motor e impõe o movimento de rotação [5];
- Um controlador (figura 2.2) que é responsável pelo funcionamento do motor, possibilitando ajustar os parâmetros, como por exemplo a velocidade do motor, de acordo com as necessidades do utilizador [6].

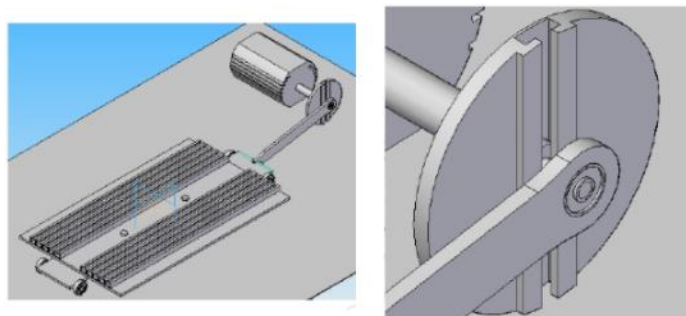


Figura 2.1- Modelo CAD 3D do mecanismo de biela manivela [5].

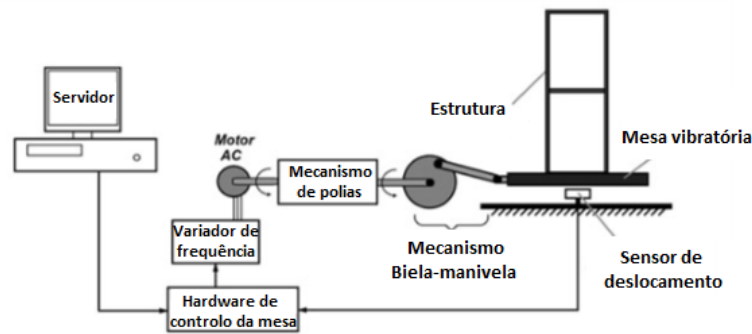


Figura 2.2- Esquema sistema de excitação com o mecanismo de biela manivela [6].

É de notar que este tipo de construção apresenta algumas limitações no que toca à necessidade de ajuste da amplitude, isto é, o ajuste terá que ser realizado manualmente pelo utilizador, introduzindo deste modo erros de natureza humana nos resultados obtidos. Assim foi necessário realizar estudos acerca de outros tipos de mecanismo de acionamento que permitam efetuar o movimento pretendido de forma automática.

2.1.2 Sistema hidráulico

Os sistemas atuados hidraulicamente (figura 2.3) são sistemas caracterizados por apresentar uma elevada capacidade de carga. A montagem da plataforma é realizada sobre um sistema de rolamentos de baixo atrito, permitindo desta forma movimentar a plataforma numa determinada direção. O movimento é realizado por meio de um atuador hidráulico (exemplo: cilindro de duplo efeito) que está ligado a uma servo-válvula, permitindo inverter o sentido do movimento do atuador, sendo este sistema representado na figura 2.4. Na seleção do atuador para este tipo de sistema, é necessário ter em consideração a força máxima a exercer, tendo em conta a carga total da mesa em conjunto com a massa da estrutura a movimentar [7].

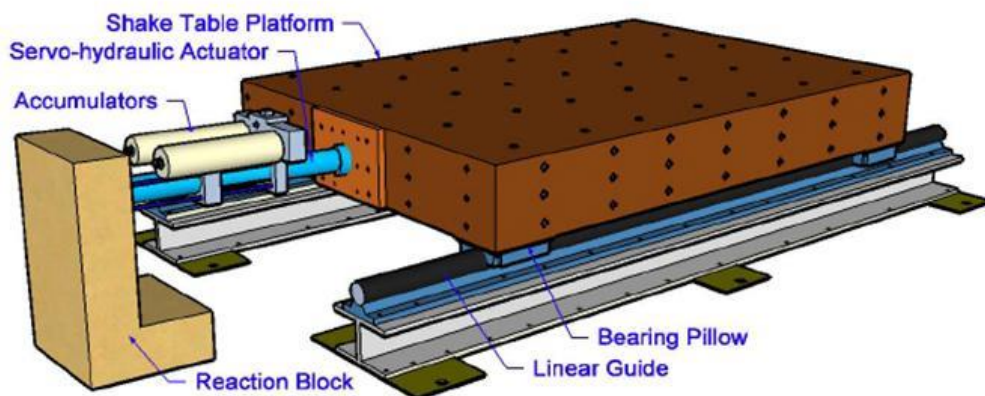


Figura 2.3- Simulador sísmico hidráulico I. I. T. Kanpur [8].

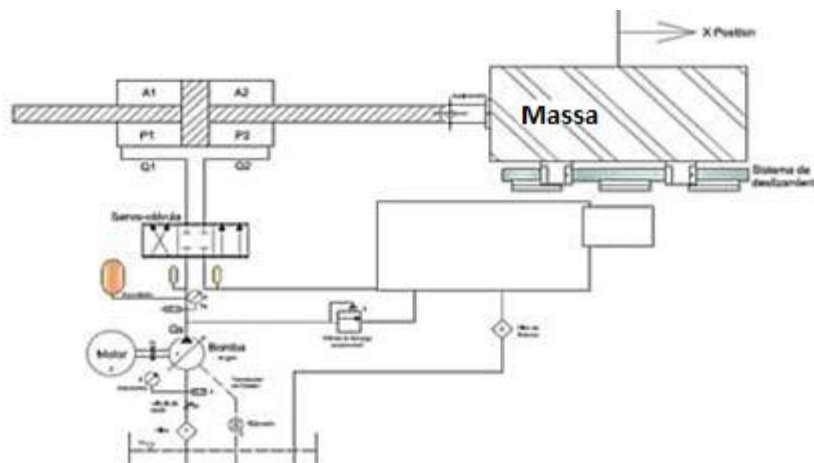


Figura 2.4- Esquema de sistema hidráulico [7].

Em suma, podemos dizer que os sistemas atuados hidraulicamente são caracterizados por serem uma das melhores opções quando existe a necessidade de mover elevadas cargas, sendo uma solução de grande fiabilidade e precisão nos movimentos a efetuar. No entanto, esta solução construtiva apresenta grande complexidade na montagem e custos elevados. Para além disso, dado que para o presente sistema não é necessária uma elevada capacidade de carga, nem grandes potências, o sistema hidráulico não se adequa aos requisitos deste projeto.

2.1.3 Sistema pneumático

O movimento gerado por uma plataforma de atuação pneumática é realizado por meio de atuadores e válvulas alimentados por ar comprimido, como representado na figura 2.5. O controle dos parâmetros como a aceleração, velocidade e posição é realizada através dos sinais elétricos que são enviados para uma electroválvula. Estes são recebidos de um controlador, na qual toma ações com base no comando fornecido. Para além dos componentes mencionados anteriormente, este sistema (figura 2.6) possui um filtro de modo a impedir a entrada de impurezas para o circuito e um sistema de regulação de pressão por forma a ajustar a pressão na rede. Tal como no sistema anterior, este tipo de sistema também poderá possuir rolamentos de modo a apoiar a plataforma e permitir o seu deslocamento numa determinada direção [9].

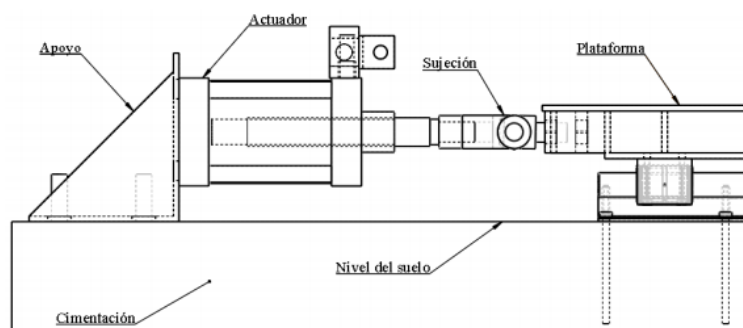
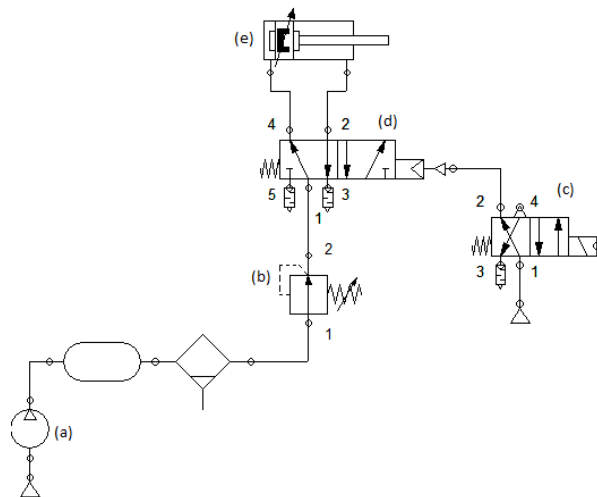


Figura 2.5- Simulador neumático [9].



Legenda:

- (a)- Compressor
- (b)- Válvula reguladora de pressão
- (c)- Electroválvulas
- (d)- Válvula de atuação pneumática
- (e)- cilindro de duplo efeito

Figura 2.6- Esquema do circuito pneumático [9].

É de referir que os sistemas atuados pneumaticamente apresentam geralmente uma precisão no posicionamento bastante inferior que os movidos hidraulicamente devido à compressibilidade do ar. Para além disso, tal como nos sistemas hidráulicos, estes também apresentam o inconveniente de não serem transportáveis para a sala de aula.

2.1.4 Sistema elétricos

O sistema da figura 2.7 é composto por um fuso de esferas que roda sobre si por ação de um motor, sendo o motor ligado ao fuso através de um sistema de acoplamento. Para além disso, existe uma carruagem unido ao fuso de esferas e à plataforma por forma a impor o movimento à plataforma. O movimento suave da plataforma numa dada direção é garantido pelo sistema de guiamento constituída por rolamentos lineares [10].



Figura 2.7- Simulador Quanser Shake Table II [10].

É de referir que esta solução construtiva é simples e apresenta um custo reduzido. Para além disso, a utilização de um fuso de esferas reduz o efeito das folgas existentes na transmissão, permitindo a plataforma realizar o movimento pretendido sem grandes desvios da trajetória pretendida.

2.2 Simuladores Sísmicos

Um simulador sísmico é uma plataforma de grande porte cujo o objetivo é a realização de ensaios das estruturas, submetendo estas a diferentes tipos de solicitações. É de referir que neste tipo de simulador é possível realizar ensaios às estruturas numa escala mais próxima da real. Assim, nesta secção serão apresentados vários exemplos reais de simuladores sísmicos bem como as suas características.

2.2.1 Simulador Sísmico E-DEFENSE

O maior simulador sísmico existente no mundo, *E-DEFENSE*, que está representado na figura 2.8, foi construído no Japão, em 2005. Este projeto foi desenvolvido juntamente com a colaboração de várias entidades Norte Americanas, tendo como finalidade a prevenção de tragédias anteriormente referidas. Através deste simulador é possível testar a resistências de diversos edifícios à escala contra sismos de grande magnitude [11].



Figura 2.8- Simulador sísmico E-DEFENSE [11].

As especificações do simulador encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Características do simulador E-DEFENSE [11]

Tipo de acionamento	Hidráulico
Nº de graus de liberdade	3
Capacidade de carga	1200 ton
Curso máximo (X/Y/Z)	1/1/0,5m
Frequência máxima	15 Hz
Velocidade máxima	2000 m/s
Aceleração máxima	$>10 \text{ m/s}^2$

2.2.2 Simulador Sísmico NEES

Outro simulador sísmico de grande porte, o NEES, apresentado na figura 2.9, encontra-se na universidade de San Diego, nos Estados Unidos da América. Este equipamento tem como característica principal a sua elevada amplitude de movimento (aproximadamente 750 mm).

O principal objetivo deste tipo de sistema consiste na simulação de estruturas à escala real, por forma obter uma resposta com uma melhor aproximação à realidade. Assim, é possível realizar uma validação e uma calibração de parâmetros com maior rigor do que no caso da utilização de simuladores de pequena escala [12].



Figura 2.9- Simulador sísmico NEES [12].

As suas principais características estão descritas na tabela 2.2.

Tabela 2.2- Características do simulador NEES [12]

Tipo de acionamento	Hidráulico
Nº de graus de liberdade	1
Capacidade de carga	2000 ton
Curso máximo	0,75 m
Frequência máxima	33 Hz
Velocidade máxima	1,8 m/s
Aceleração máxima	12 - 42 m/s ²

2.2.3 Simulador sísmico MTS

A MTS é uma empresa que lidera a nível mundial os equipamentos de ensaios de estruturas, esta empresa disponibiliza uma vasta gama de simuladores sísmicos para modelos de pequena escala (figura 2.10), sendo o custo associado aos equipamentos comercializados bastante inferior ao dos modelos à escala real. Contudo, para além do fator económico, os equipamentos apresentam facilidade na montagem, tornando-os mais acessíveis e sem grande complexidade na instalação [13, 14].



Figura 2.10- Simulador sísmico MTS 1.5 m e 3.0 m [13].

As características do equipamento MTS 3.0 encontram-se na tabela 2.3.

Tabela 2.3- Características do simulador MTS 3.0 m [13]

Tipo de acionamento	Hidráulico
Nº de graus de liberdade	1
Capacidade de carga	10 ton
Curso máximo	0,25 m
Frequência máxima	50 Hz
Velocidade máxima	1 m/s
Aceleração máxima	10 m/s ²

2.2.4 Simulador Sísmico da FEUP

O simulador sísmico (figura 2.11) disponível no Departamento de Engenharia Civil (DEC), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foi projetado com o propósito de estudar o efeito de ondas sísmicas em estruturas de médio porte. Atualmente, a mesa sísmica contém apenas um servomotor, funcionando deste modo como apenas um simulador uniaxial, no entanto, está prevista a implementação de um segundo servomotor, tornando o simulador biaxial. Para o controlo da mesa, é utilizado um PLC por forma a enviar sinais ao drive que controla diretamente o servomotor, permitindo deste modo realizar o movimento pretendido.



Figura 2.11- Simulador sísmico do DEC.

As características do simulador estão presentes na tabela 2.4.

Tabela 2.4- Características do simulador sísmico DEC

Tipo de acionamento	Elétrico
Nº de graus de liberdade	1
Capacidade de carga	20 ton
Curso máximo	0,4 m
Frequência máxima	20 Hz
Velocidade máxima	0,37 m/s
Aceleração máxima	5 m/s ²

2.3 Simulador de vibrações

Os simuladores de vibrações são caracterizados por ter uma dimensão mais reduzida que os simuladores sísmicos, a procura deste tipo de simuladores tem vindo a ganhar grande relevância no mercado, devido ao facto de o rigor e exigências presentes nos regulamentos atuais serem cada vez mais apertadas.

2.3.1 EHST (electro-hydraulic shaking table) Xuzhou University

Na universidade de Xuzhou, na China, foi criado um simulador de vibrações (figura 2.12) com 6 graus de liberdade. Este simulador apresenta uma complexidade bastante elevada, pois possui múltiplas combinações possíveis para cada eixo para uma mesma configuração.

Para o simulador é utilizado um controlo do tipo adaptativo, sendo o sistema controlado em malha fechada. Assim, através deste simulador é possível realizar ensaios para qualquer modo de vibração por mais complexo seja o movimento a realizar [15].

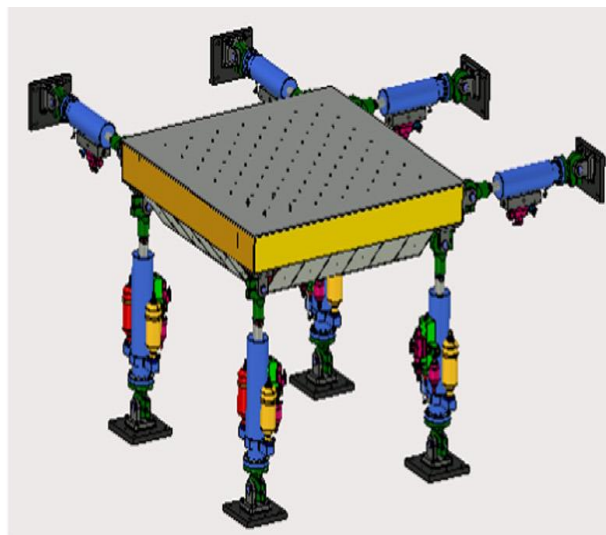


Figura 2.12-Simulador de vibrações EHST [15].

As características deste equipamento encontram-se na tabela 2.5.

Tabela 2.5- Características do simulador de vibrações EHST [15]

Tipo de acionamento	Hidráulico
Nº de graus de liberdade	6
Capacidade de carga	4 ton
Curso máximo (X/Y/Z)	0,1/0,1/0,1 m
Frequência máxima	30 Hz
Velocidade máxima	0,5 m/s
Aceleração máxima	20 m/s ²

2.3.2 Quanser Shake Table III

Para além dos exemplos de simuladores mencionados anteriormente, por vezes existem simuladores de pequena escala com o propósito didático (figura 2.13). Através deste tipo de simulador é possível realizar o estudo dinâmico das estruturas, não requerendo tanto rigor nos tipos de movimentos a realizar pelo sistema [10].



Figura 2.13- Simulador Quanser Shake Table III [10].

As características deste simulador estão apresentadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6- Características do simulador de vibrações Quanser Shake Table III [10]

Tipo de acionamento	Elétrico
Nº de graus de liberdade	2
Capacidade de carga	100 kg
Curso máximo (X/Y)	0,11/0,11 m
Frequência máxima	10 Hz
Velocidade máxima (X/Y)	1,55/1,29 m/s
Aceleração máxima	10 m/s ²

Através da análise da tabela 2.6, podemos observar que as características deste tipo de simulador são bastante inferiores à dos outros simuladores anteriormente expostos, dada a sua finalidade de utilização. Como podemos observar na figura 2.14, o acionamento da mesa vibratória

é do tipo elétrico, com recurso a um motor linear e um servocontrolador, por forma a impor o movimento pretendido. Dada a aplicação em causa, esta mesa apresenta uma capacidade de carga bastante inferior às mesas anteriormente referidas.

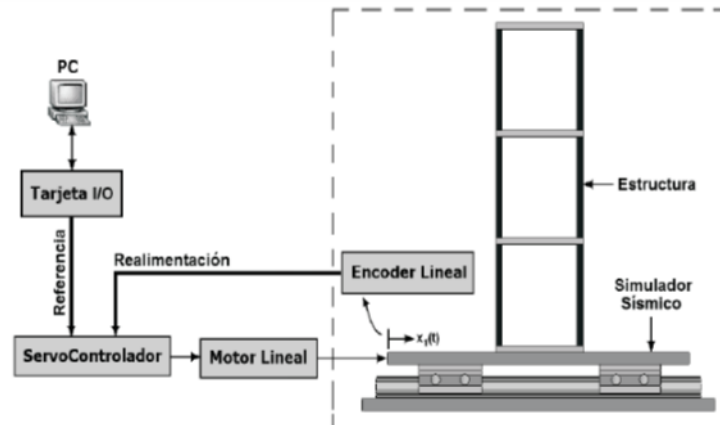


Figura 2.14- Diagrama esquemático da mesa vibratória [16].

2.3.3 Simulador Multiaxial da FEUP

No Laboratório de Óleo-Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foi projetado um simulador de vibrações multiaxial de atuação pneumática (figura 2.15) com objetivo de demonstrar o efeito das vibrações em estruturas em escala reduzida. Este sistema é controlado recorrendo a um PLC, sendo a programação realizada no software *Unity® ProS®*.



Figura 2.15- Simulador Multiaxial FEUP.

As características do simulador encontram-se na tabela 2.7.

Tabela 2.7- Características do simulador Multiaxial FEUP

Tipo de acionamento	Pneumático
Nº de graus de liberdade	5
Capacidade de carga	100 kg
Curso máximo	8 mm
Frequência máxima	15 Hz
Velocidade máxima (X/Y)	0,4 m/s
Aceleração máxima	34 m/s ²

É de notar que este simulador apresenta uma característica peculiar, pois a sua atuação é do tipo pneumática, com recurso a músculos, sendo um tipo de construção pouco comum no mercado. Contudo, o custo associado a este tipo de solução construtiva é inferior as das soluções hidráulicas.

2.3.4 Simulador Universidade Valladolid

Na universidade de Valladolid, em Espanha, foi construído um simulador de vibrações (figura 2.16) para estruturas de pequeno porte. Para o acionamento deste sistema recorreu-se ao uso de um motor passo a passo, que por sua vez é comandado através de um drive controlado por um arduino [17].

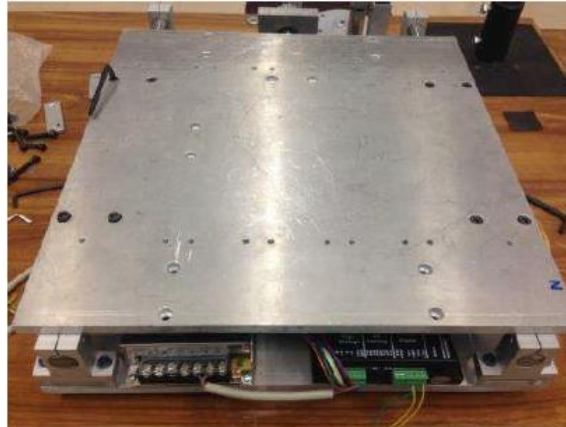


Figura 2.16- Simulador Universidade Valladolid [17].

Para além do arduino, este sistema recorre ao uso de uma placa de aquisição de dados (figura 2.17) de modo a permitir medir qualquer sinal proveniente dos sensores de forma eficaz e rápida. De modo a facilitar a análise dos dados recolhidos, é utilizado o software, DEWEsoft, que permite caracterizar a onda e exportar os resultados da análise [17].



Figura 2.17- Placa de aquisição de dados, SIRIUS [17].

As características da mesa vibratória estão presentes na tabela 2.8.

Tabela 2.8- Características do simulador Universidade Valladolid [17]

Tipo de acionamento	Elétrico
Nº de graus de liberdade	1
Capacidade de carga	5 kg
Curso máximo	20 mm
Frequência máxima	8 Hz
Velocidade máxima (X/Y)	0,66 m/s
Aceleração máxima	25 m/s ²

3 Projeto do simulador uniaxial

Neste capítulo pretende-se descrever o desenvolvimento do simulador uniaxial, desde a especificação do sistema, escolha dos seus constituintes e modificações a realizar ao projeto inicial. Tal como já foi referido na secção 1.1, o sistema desenvolvido vem dar continuidade ao projeto iniciado pelo colega Jorge Almeida em 2015.

3.1 Requisitos e especificações do sistema

Como já referido nos objetivos para esta dissertação, foi proposta a realização de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos. Para esse fim, foram definidos os requisitos e especificações que devem ser cumpridas no desenvolvimento do protótipo.

Requisitos funcionais:

- Interface de controlo do sistema em LabVIEW;
- Simulação de ondas sinusoidais para diferentes amplitudes e frequências;
- Capacidade de simular uma onda sísmica real proveniente de um ficheiro csv;
- Aquisição da posição e aceleração durante simulação;
- Controlo do sistema em malha fechada;
- Solução construtiva leve e facilmente transportável.

Especificações:

- Frequência máxima da onda de 5 Hz;
- Amplitude de onda de 10 mm.

3.2 Arquitetura do sistema

Antes de realizar qualquer ensaio ou estudo, é necessário compreender bem a arquitetura do sistema e quais os seus principais elementos (figura 3.1).

Através da figura 3.1 podemos verificar que existem três tipos de ligações à placa de aquisição de dados, sendo esta feita com as seguintes finalidades:

- Servir de interface entre o computador e os sinais provenientes dos sensores da mesa;
- Comando do driver do motor por parte do utilizador através da ligação 10 pin IDC.

A programação do sistema de controlo bem como a interface do utilizador é realizada com recurso ao software *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*).

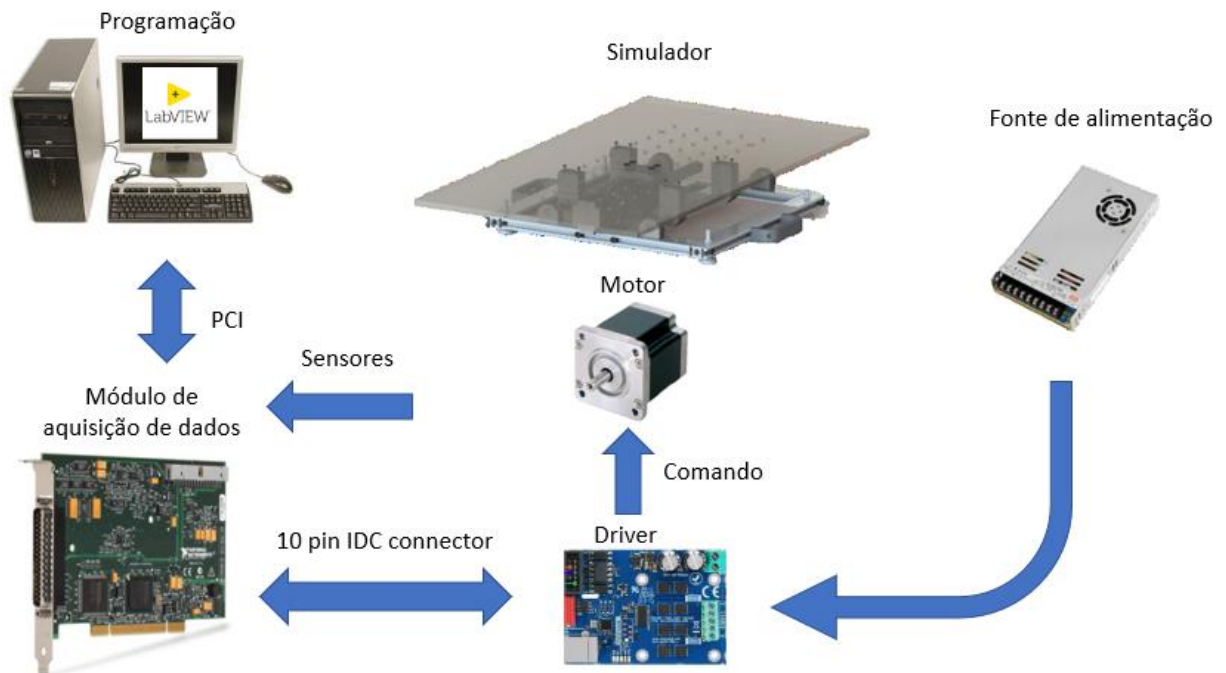


Figura 3.1- Esquema da arquitetura do sistema.

3.3 Estrutura do simulador uniaxial

Tal como está representado na figura 3.2, é possível verificar que a estrutura do simulador é composta por:

- Seis perfis Bosch (1);
- Dois veios (2), cada um suportando dois rolamentos lineares (3) e sendo suportado por dois apoios (4) localizados nas extremidades do veio. Estes veios garantem o alinhamento da mesa aquando do movimento de translação, servindo deste modo de guias para os rolamentos lineares (3);
- Quatro blocos de alumínio (5), que permitem realizar a compensação da diferença de alturas entre a carruagem do fuso de esferas (6) e os rolamentos lineares;
- Um apoio simples (8) e um apoio duplo (7) contendo um rolamento de esferas, de modo a fixar o fuso de esferas;
- Um acoplamento elástico (9), permitindo realizar a ligação do fuso com o veio do motor;
- Duas pegas (10);
- Um suporte para o motor (11);
- Um motor elétrico DC (12);
- Um transdutor potenciométrico (13);
- Um acoplamento da haste do transdutor (14);
- Um fuso de esferas (15);
- Dois sensores fim de curso (16) situados nas proximidades de cada apoio do fuso de esferas.

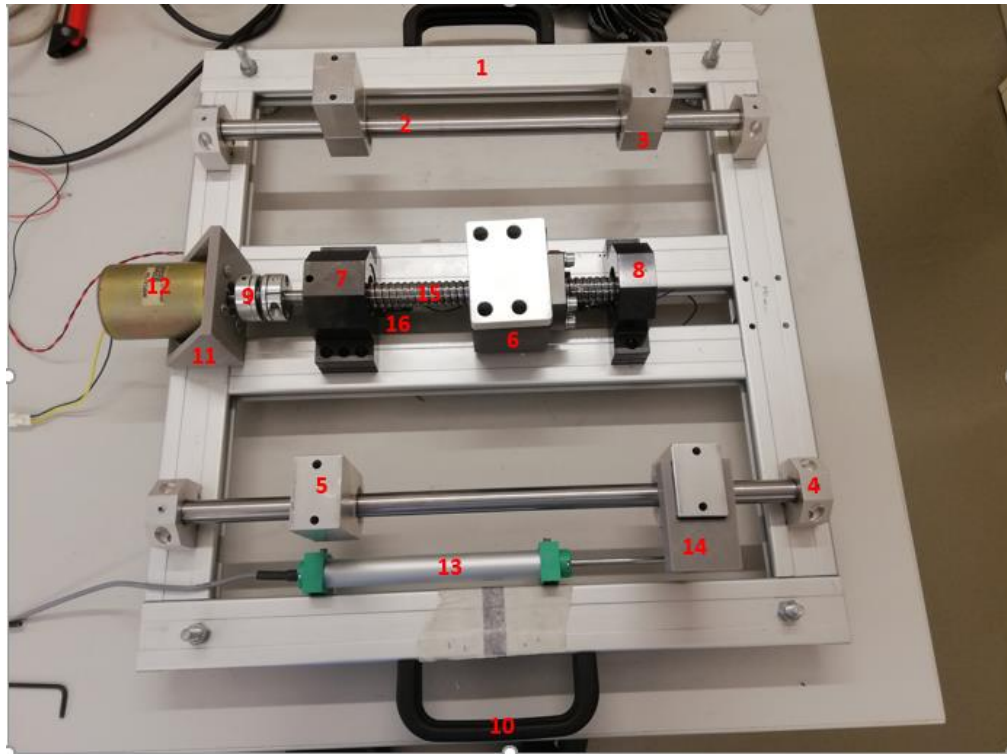


Figura 3.2- Estrutura e componentes constituintes do simulador uniaxial.

Para além das componentes mencionados anteriormente, o simulador uniaxial ainda apresenta um tampo (figura 3.3), onde é fixada a estrutura na qual se irão realizar os ensaios submetendo a diferentes tipos de solicitações de acordo com os parâmetros (tipo de onda, frequência, amplitude, entre outros) impostos pelo utilizador.

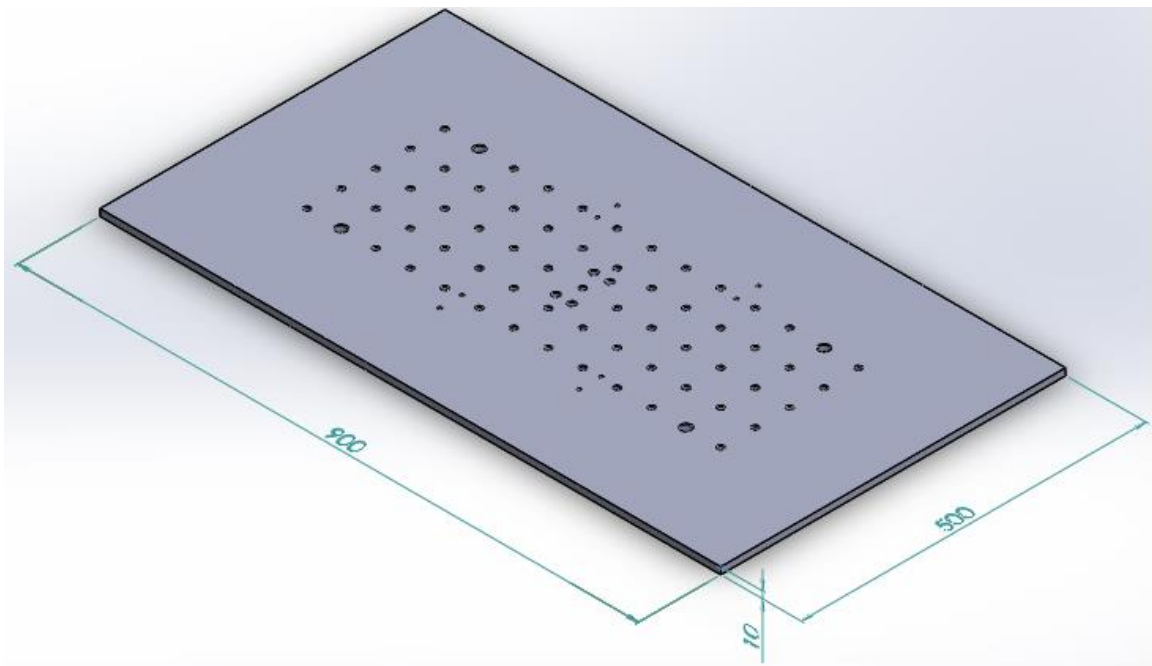


Figura 3.3- Tampo do simulador uniaxial.

3.4 Fuso de esferas

Um fuso é um elemento de transmissão mecânica que converte um movimento de rotação num movimento de translação. O fuso (figura 3.4) presente no projeto é o modelo FEM-E-C cuja as características estão indicadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Características principais do fuso de esferas [18]

Diâmetro nominal	20 mm
Passo	5 mm
Capacidade de carga dinâmica	17200 N
Capacidade de carga estática	21500 N
Velocidade máxima	0,5 m/s



Figura 3.4- Fuso de esferas com flange [18].

Para além do fuso de esferas, o sistema também contém uma porca e o suporte modelo MGD (figura 3.5) que realiza a ligação entre o fuso de esferas e o tampo do simulador, cujas a características estão no anexo A.

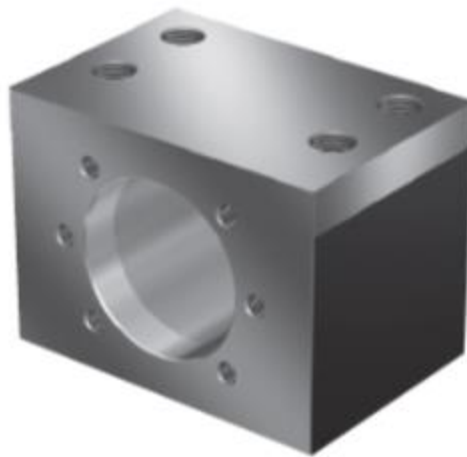


Figura 3.5- Carruagem do fuso de esferas, modelo MGD [18].

Para o cálculo do valor do binário a aplicar ao fuso, para que este consiga movimentar a carga, foi utilizada a equação (3.1) [19].

$$T_{requerido} = (J_{carga} + J_{motor}) \times \dot{\omega}_{max} \quad (3.1)$$

Onde,

$T_{requerido}$ – Binário requerido ao motor [Nm]

J_{carga} – Momento de inércia das cargas [kg·m²]

J_{motor} – Momento de inércia do motor [kg·m²]

$\dot{\omega}_{max}$ – Aceleração angular máxima [rad/s²]

Para obter o valor da inércia da carga presente no sistema recorreu-se à equação (3.2).

$$J_{carga} = \frac{m_{total} \times p^2}{4 \times \pi^2 \times \eta} + J_{fuso} \quad (3.2)$$

$$m_{total} = m_{mesa} + m_{estrutura} + m_{carruagem} \quad (3.3)$$

$$m_{total} = 6 + 3 + 1,18 = 10,18 \text{ kg} \quad (3.4)$$

$$J_{fuso} = 1,97 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.5)$$

$$J_{carga} = \frac{10,18 \times 0,005^2}{4 \times \pi^2 \times 0,9} + 1,97 \times 10^{-5} = 2,68 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.6)$$

Onde,

η – Rendimento mecânico

J_{fuso} – Momento de inércia do fuso de esferas

m_{total} – Massa total da carga

Dado que se pretende simular uma onda sinusoidal com uma amplitude de 10 mm à frequência de 5 Hz, assim o movimento de resposta da mesa será dado por:

$$x(t) = 10 \times \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

Deste modo, para a aceleração temos:

$$a(t) = -10 \times \omega^2 \times \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

Como os valores de $\sin(\omega t)$ estão compreendidos entre -1 e 1, logo a aceleração máxima tomará o valor de:

$$a_{max} = 10 \times \omega^2 = 10 \times (2\pi f)^2 \quad (3.9)$$

$$a_{max} = 10 \times (2\pi \times 5)^2 = 9869,6 \text{ mm/s}^2 = 9,87 \text{ m/s}^2 \quad (3.10)$$

$$\dot{\omega}_{max} = \frac{a_{max} \times 2\pi}{p} = \frac{9,87 \times 2\pi}{5 \times 10^{-3}} = 12403,01 \text{ rad/s}^2 \quad (3.11)$$

Onde,

P – Passo do fuso de esferas [m]

Para um $J_{motor} = 4,01 \times 10^{-5}$ [20], o binário requerido vem da forma,

$$T_{requerido} = (J_{carga} + J_{motor}) \times \dot{\omega}_{max} \quad (3.12)$$

$$T_{requerido} = (2,68 \times 10^{-5} + 4,01 \times 10^{-5}) \times 12403,01 = 0,83 \text{ Nm} \quad (3.13)$$

O valor do $T_{requerido}$ obtido na equação (3.13) é bastante importante no que toca à seleção do motor para a aplicação. Dado que o nosso sistema não inclui nenhum redutor, o motor terá de ser capaz de exercer o binário calculado na equação (3.13) por forma a movimentar a plataforma.

3.5 Circuito elétrico

O sistema elétrico a desenvolver para o dispositivo tem a finalidade de adquirir e processar sinais dos sensores e permitir a comunicação com o computador através de uma ligação PCI (*Peripheral Component Interconnect*), bem como o comando e potência do motor elétrico.

Devido ao requisito de conhecer a posição da mesa no seu intervalo de funcionamento, é preciso recorrer ao uso de um sensor de deslocamento. Este irá ser implementado por forma a fornecer *feedback* ao sistema, permitindo ajustar automaticamente propriedades que dependam da posição medida. Outro aspeto a analisar no nosso sistema é a aceleração a que o simulador e a estrutura de teste estão sujeitos. Para esse efeito, é necessário o uso de acelerómetros. Estes são colocados no sistema por forma a fornecer o valor da aceleração durante o ciclo de funcionamento do simulador.

Para o sistema de comando será usado um computador com o *software* LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), versão 2017. Este software será também usado para criar a interface gráfica, na qual o utilizador terá acesso aos dados dos sensores do sistema e poderá definir os parâmetros necessários ao funcionamento da mesa. Estes detalhes de programação serão discutidos na secção 4.2. Ainda no sistema de comando, a aquisição de dados dos sensores e comunicação entre o PC e o dispositivo, ficará a cargo de uma placa de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments* (NI-PCI 6221). O sistema de potência é composto por uma fonte de alimentação de 24 V ligada diretamente ao driver que irá comandar o motor em causa.

Todo os esquemas elétricos do projeto estão presentes no anexo B.

3.5.1 Motor passo a passo

Como já foi referido anteriormente, este projeto vem dar continuação a um trabalho realizado anteriormente, que usava um motor passo a passo.

Sendo o motor passo a passo a solução de acionamento do simulador, torna-se imperativo ter uma compreensão mais detalhada das suas principais características e do seu modo de funcionamento. Só deste modo é que será possível entender o princípio de movimentação do simulador.

O motor passo a passo é um tipo de motor elétrico usado para aplicações onde é necessária uma precisão no posicionamento. Para este tipo de motor, é necessário o uso de um driver para o comando. Na figura 3.6 podemos observar uma configuração típica de um sistema de comando para um motor passo a passo.

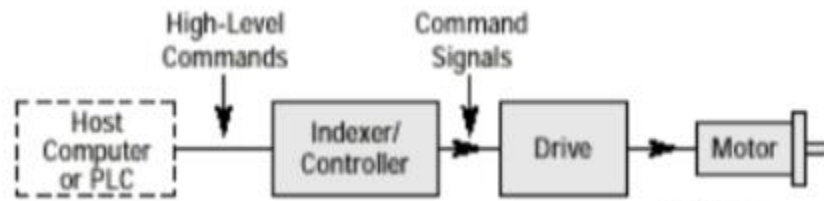


Figura 3.6- Configuração típica de um sistema com o motor passo a passo [21].

Da figura 3.6 podemos verificar as diferentes componentes que constituem um sistema de comando para o motor passo a passo, onde o *indexer* é um sistema baseado em microprocessador capaz de gerar funções de comando para o driver (sinais de direção, sinais de impulsos de passo, entre outros). Para além do indexer, temos o driver que é responsável por converter os sinais de comando do indexer em sinais de potência para alimentação do motor. Por fim podemos observar que o comando poderá ser realizado em anel aberto, isto é, o sistema não necessita de transdutores para obter a posição do motor assumindo que não há perdas de passos.

Quanto ao motor passo a passo, podemos referir que este oferece algumas características desejáveis tais como:

- Ser robusto e sem necessidade de manutenção;
- Possibilidade de funcionamento em anel aberto em controlo de posição e velocidade;
- Binário elevado a baixa velocidade;
- Possibilidade de dispensar o uso de redutores;
- Baixo custo do motor, mas não do driver e indexer;
- Sistema inerentemente digital.

Contudo, existe um conjunto de características indesejáveis tais como:

- Ressonância a baixas velocidades;
- Comportamento oscilatório no movimento passo a passo com tempo de estabilização relativamente longos;
- Consumo de corrente independente da carga aplicada, o que provoca um aquecimento elevado do motor;
- Possibilidade de perder passos e portanto a posição para velocidades elevadas (se utilizado em controlo de anel aberto).

Quanto ao princípio de funcionamento podemos referir que este tipo de motor converte os impulsos elétricos em movimento angular, em que o número de impulsos traduz a posição a que o motor se encontra e a frequências de impulsos a velocidade de rotação do motor.

Para este tipo de motor, também é possível ter diferentes tipos de configuração para os enrolamentos (figura 3.7):

- Unifilares, quando existe um enrolamento por pólo estatórico, sendo uma ligação de quatro fios;
- Bifilares, quando existem dois enrolamentos por pólo estatórico, podendo as ligações ser de cinco, seis ou oito fios.

Apesar da existência de diferentes tipos de configuração, a configuração mais comum é o enrolamento bifilar de oito fios, permitindo ligação em série e paralela.

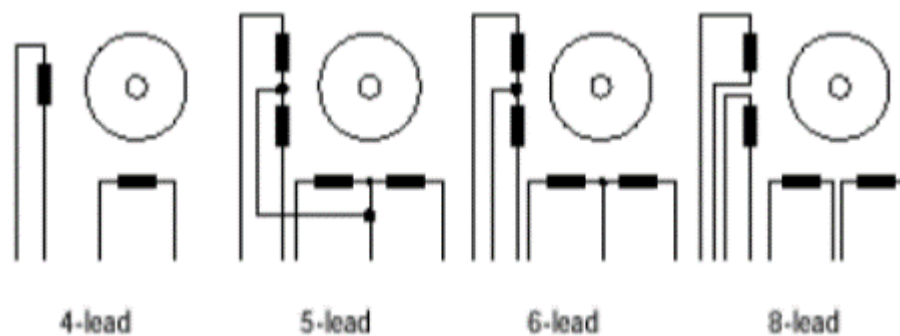


Figura 3.7- Configuração para os enrolamentos do motor passo a passo [21].

No que toca à alimentação deste tipo de motores, estes dividem-se em:

- Unipolares, onde as correntes de alimentação são unidirecionais, aplicável para motores de 5, 6 ou 8 fios (figura 3.8 a)). Assim, os enrolamentos são do tipo bifilares de modo a que a corrente circule sempre no mesmo sentido, sendo necessário comutar a alimentação entre as duas metades dos enrolamentos;
- Bipolares, onde as correntes de alimentação são bidirecionais, aplicável para motores de 4, 5, 6 ou 8 fios. Sendo possível realizar ligação em série (figura 3.8 b)) apresentando um maior binário a baixas velocidades ou paralelo (figura 3.8 c)) na qual possui um maior binário a velocidades elevadas [21].

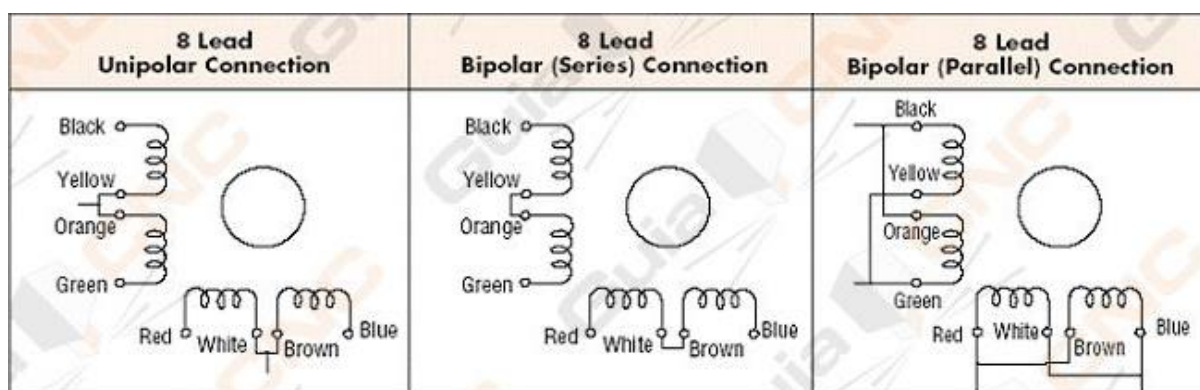


Figura 3.8- Ligação unipolar e bipolar [21].

Para o nosso sistema, o acionamento do simulador uniaxial deve ser realizado através de um motor que permita ter uma boa precisão e controlo do movimento a realizar, deste modo foi escolhido o motor passo a passo. Este foi escolhido pelo facto de ser um motor robusto, baixo custo e sem necessidade de manutenção. Para além disso, este possui uma precisão elevada a baixas velocidades. Contudo, por forma a controlar a posição do motor quando este se encontra a rodar a velocidades elevadas, recorreu-se à implementação de um transdutor potenciométrico no fuso, permitindo assim, corrigir os erros associados à perda de passos. Assim, para o nosso sistema foi utilizado um motor da série da PKP2964D45 da *Oriental Motor*, cujas características se encontram na figura 3.9.

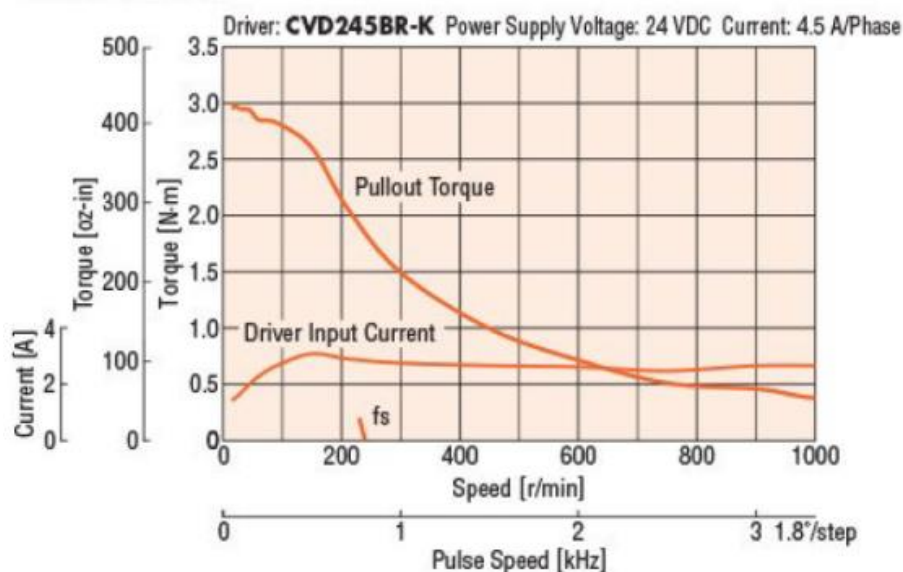
PKP296D45

Figura 3.9- Curva característica do motor passo a passo [22].

Para além da característica mencionada anteriormente, este tipo de motor possui um elevado binário a baixas velocidades que diminui à medida que a velocidade é aumentada. Esta relação pode ser observada na figura 3.9. As especificações do motor passo a passo escolhido estão apresentados na figura 3.10.

Step Angle 1.8° Frame Size 85 mm (3.35 in.) Bipolar**Specifications**

Product Name	Holding Torque N-m (oz-in)	Rated Current A/Phase	Voltage VDC	Winding Resistance Ω /Phase	Inductance mH/Phase	Rotor Inertia J: kg-m ² (oz-in ²)	Lead Wires
PKP296D45 <input type="checkbox"/> A	3.3	4.5	1.9	0.42	3.1	1100×10^{-7}	4
PKP296D63 <input type="checkbox"/> A	(467)	6.3	1.4	0.23	1.6	(6.0)	
PKP299D45 <input type="checkbox"/> A	6.4	4.5	2.7	0.6	5.4	2200×10^{-7}	
PKP299D63 <input type="checkbox"/> A	(906)	6.3	2	0.32	2.6	(12)	
PKP2913D45 <input type="checkbox"/> A	9.5	4.5	3.5	0.78	6.9	3400×10^{-7}	
PKP2913D56 <input type="checkbox"/> A	(1345)	5.6	2.6	0.47	4.4	(18.6)	

● Either **A** (Single Shaft) or **B** (Double Shaft) indicating the configuration is specified where the box ☐ is located in the product name.

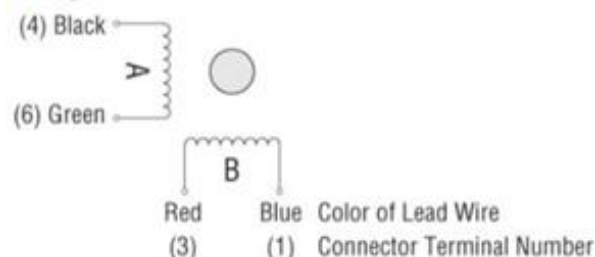
Inner Wiring Diagram for Motor**Bipolar 4 Lead Wires**

Figura 3.10 - Especificações do motor passo a passo serie PK296D45BA [22].

Como podemos observar na figura 3.10, este motor apenas possui uma configuração do tipo bipolar de 4 fios, suportando correntes de alimentação. Além disso, dado que o motor apresenta um

passo de 1.8° (fullstep), deste modo é necessário que o motor dê 200 passos de modo a realizar uma rotação completa.

3.5.2 Driver do motor passo a passo

No projeto inicial foi utilizado um *driver* da série *PoStep60*, ligado uma fonte de alimentação de 24V, sendo o controlo do motor passo a passo realizado através da ligação 10 pin IDC.

É de referir que é o driver o principal responsável pela inversão do sentido de rotação. Para além disso, através do software do driver do motor (figura 3.11) é possível configurar o número de steps por rotação, assim, o motor pode funcionar a *fullstep*, *halfstep* ou até mesmo em *microstep*.

O modo como o step é seleccionado é de extrema importância no que toca ao comportamento do motor, pois o número de impulsos que o driver terá de gerar para que o motor faça uma rotação completa é inversamente proporcional ao ângulo de rotação por impulso. Por exemplo, no modo *halfstep* cada impulso gera uma rotação de $1,8^\circ/2 = 0,9^\circ$, assim o driver terá de gerar o dobro do número de impulso ($360^\circ/0,9^\circ = 400$ impulsos) para que o motor realize uma rotação completa.

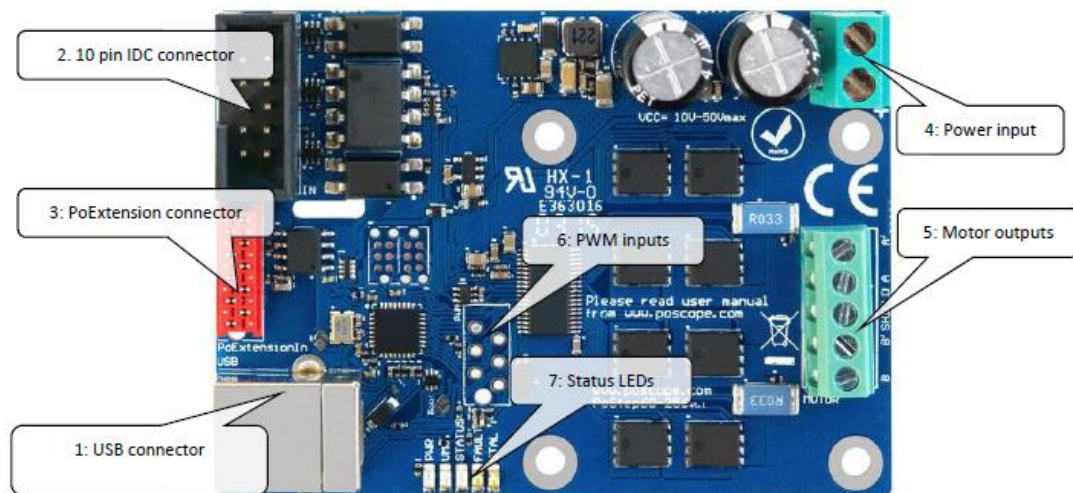


Figura 3.11- Driver do motor passo a passo, *PoStep60* [23].

Outro aspeto a ter em consideração, é o facto do motor passo a passo consumir bastante corrente independentemente da carga aplicada, o que provoca um aquecimento elevado do motor. Deste modo, o driver do motor será responsável por controlar a passagem da corrente proveniente da fonte de alimentação externa para o motor.

3.5.3 Verificação das especificações do sistema

De acordo com as especificações mencionadas na secção 3.1, a plataforma sísmica a desenvolver deveria ser capaz de simular uma onda sinusoidal com uma amplitude de 10 mm a uma frequência de 5 Hz (figura 3.12).

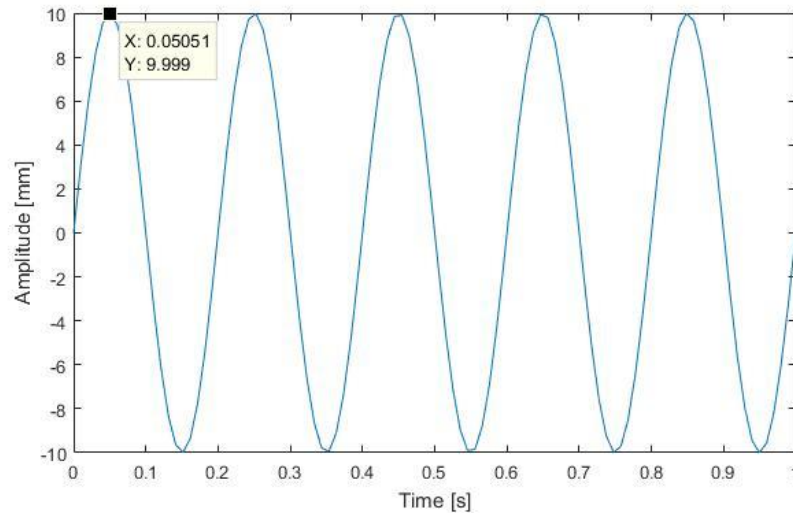


Figura 3.12- Referência de posição da mesa em função do tempo.

Através da figura 3.12 podemos observar que para uma onda sinusoidal de frequência 5 Hz com uma amplitude de 10 mm o primeiro valor do máximo da função é atingido passado um tempo de aproximadamente 0,05 s. Assim, considerando para uma primeira aproximação como sendo uma velocidade constante durante todo o percurso temos que:

$$V = \frac{\Delta Y}{\Delta t} = \frac{10}{0,05} = 200 \text{ mm/s} \quad (3.14)$$

Onde,

V – Velocidade linear [mm/s]

ΔY – Distância a percorrer [mm]

Δt – Intervalo de tempo [s]

Dado que o fuso de esferas da mesa tem um passo de 5 mm, assim a velocidade de rotação toma o seguinte valor:

$$n = \frac{V}{P} = \frac{200 \times 60}{5} = 2400 \text{ rpm} \quad (3.15)$$

Onde,

n – Velocidade de rotação [rotação/s]

Por forma a perceber o comportamento do motor passo a passo quando este está sujeito a cargas, foram realizados alguns testes ao motor com o intuito de verificar se o motor cumpre ou não com as especificações projeto. Assim, foram realizados testes referentes à velocidade máxima de rotação do motor, verificando-se que o número de pulsos máximo a que o motor responde é de 750 steps/s. Assim a velocidade de rotação máxima do motor será:

$$n = \frac{750 \text{ steps/s} \times 60}{200 \text{ steps/rotação}} = 210 \text{ rpm} \quad (3.16)$$

Comparando o valor obtido na equação (3.15) com o valor obtido da equação (3.16), podemos verificar que a velocidade máxima que o motor passo a passo consegue, é cerca de 10 vezes inferior à velocidade pretendida, deste modo, o motor passo a passo não cumpre com as especificações impostas para este projeto.

De modo a confirmar que a limitação da velocidade de rotação do motor passo a passo não é causada pelo atraso de resposta do software, utilizou-se um gerador de funções do fabricante *TTI* da série *TG550*, de modo a substituir o gerador de pulsos do software (*LabVIEW* 2017). O resultado obtido para a velocidade de rotação máxima do motor passo a passo foi aproximadamente igual ao valor obtido anteriormente, o que indica que a limitação da velocidade de rotação máxima do motor não era causada pelo software.

Após ter verificado que o problema da velocidade de rotação máxima do motor não se incidia no software, foi necessário então verificar que a limitação da velocidade não era causada pelo driver do motor passo a passo. Dado que o driver do motor utilizado possui um microcontrolador, assim substituiu-se este por um driver sem microcontrolador representado na figura 3.13.

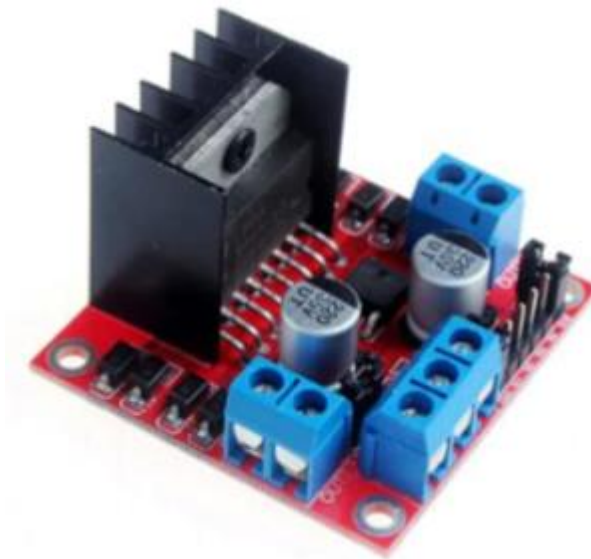


Figura 3.13- Driver do motor passo a passo, modelo L298 [24].

Os resultados obtidos com o novo driver assemelham-se aos resultados obtidos recorrendo ao driver anterior. Desta forma podemos afirmar que a limitação da velocidade máxima de rotação do motor não é causada pelo driver, mas sim, associado ao próprio motor. Como tal, foi necessário alterar o tipo de motor, tendo sido escolhido em alternativa ao motor passo a passo, um motor DC. Este tipo de motor foi escolhido, porque permite alcançar maiores velocidades do que o motor passo a passo e também pelo facto de este apresentar um custo reduzido em comparação com outro tipo de motores como por exemplo, servomotores ou motores lineares.

3.5.4 Motor DC

Tal como foi referido no final da secção 3.5.3, foi necessário utilizar um motor DC para o nosso projeto, por forma a cumprir com as especificações do sistema. Sendo assim é necessário ter uma compreensão mais detalhada acerca das suas principais características e modo de funcionamento.

O motor DC (figura 3.14) é um tipo de motor elétrico que é constituído pelos seguintes elementos:

- Estator (indutor) – parte fixa, que pode ser do tipo bobinado ou ímã permanente;
- Rotor (induzido/armadura) – parte móvel;
- Coletor (comutador mecânico) – que contém lâminas normalmente de cobre no rotor e escovas normalmente de grafite no estator.

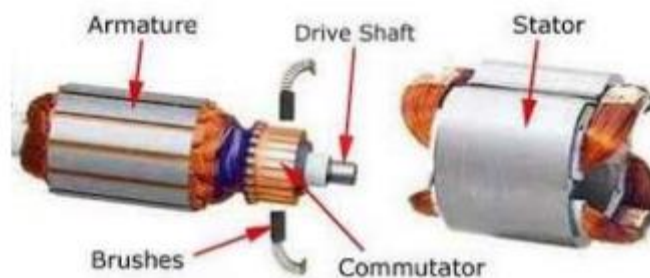


Figura 3.14- Esquema do motor DC com escovas [21].

Quanto às vantagens deste tipo de motor, podemos referir que este apresenta uma eletrônica de controlo relativamente simples e um custo reduzido. No entanto, este tipo de motor apresenta algumas desvantagens como a necessidade e substituição periódica das escovas.

No que toca ao princípio de funcionamento deste tipo de motores, podemos referir que é a corrente que determina o binário produzido, isto é quanto maior for a carga, maior será a corrente exigida pelo motor e vice-versa. Para o caso em que o binário de carga do motor é constante, a velocidade do motor apenas depende da tensão de alimentação. Assim a velocidade de rotação do motor será maior ou menor de acordo com a tensão a que o motor é alimentado [21].

Para o nosso projeto foi utilizado um motor DC com escovas de 24 V da série NC5475B da NISCA, cujas características se encontram na figura 3.15. É de referir que a seleção deste motor se deve ao facto de este já se encontrar no laboratório, não sendo deste modo necessário aquisição de um novo motor DC.

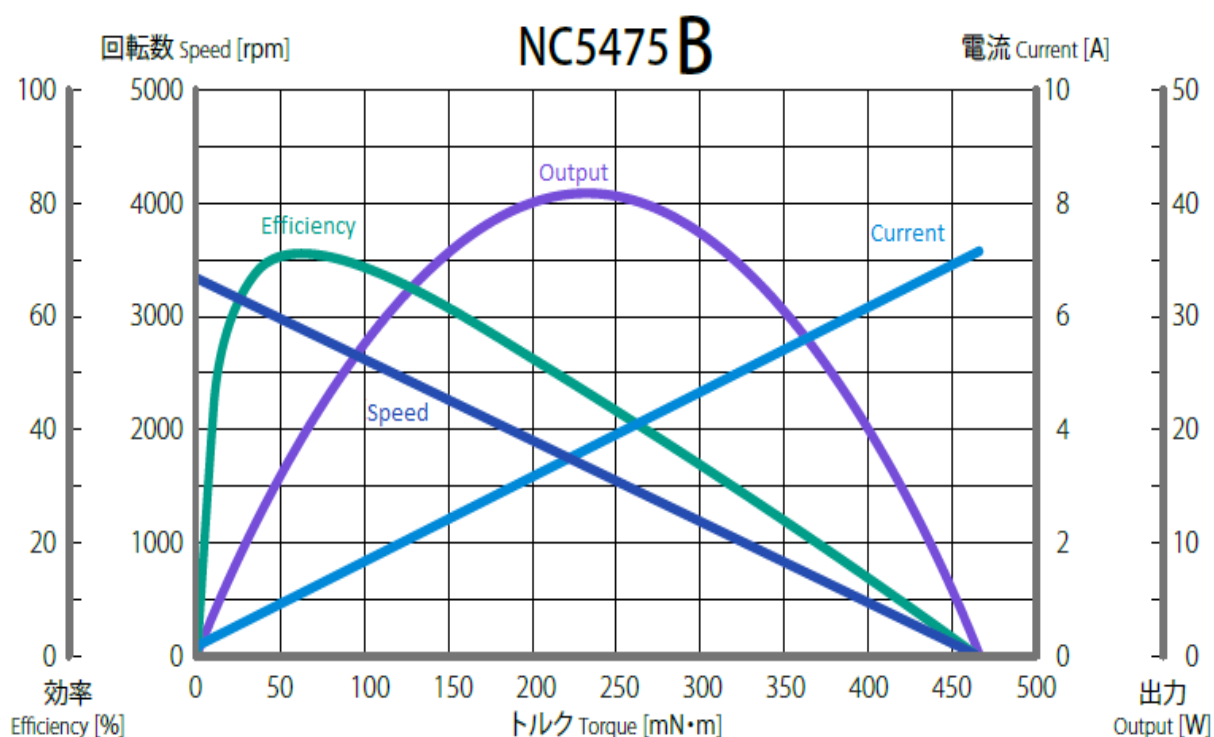


Figura 3.15- Curva característica do motor DC [25].

Como já foi demonstrado anteriormente na equação (3.13), o motor a utilizar neste projeto deve ser capaz de exercer um binário superior a 0,83 Nm. Assim, analisando a figura 3.15 podemos verificar que este motor não cumpre com esta condição. No entanto, dado que é mais importante cumprir com especificação da frequência do que da amplitude, assim para uma amplitude de 5 mm (correspondente a um $T_{requerido} = 0,42 \text{ Nm}$), o motor se encontra capaz dentro dos limites funcionais. Contudo, o comportamento de resposta relativamente à velocidade de rotação máxima do motor é melhor do que o caso do motor anterior. Como podemos observar figura 3.15, a velocidade máxima do situa-se próximo do valor de 3000 rpm, o que equivale a 50 rps (equação (3.17), um valor bastante aceitável comparativamente ao valor de referência de velocidade de 40 rps (equação (3.15).

$$n = \frac{3000 \text{ rpm}}{60} = 50 \text{ rps} \quad (3.17)$$

Para além da curva característica do motor, o catálogo do fabricante também disponibiliza uma tabela de especificações apresentada no anexo C com informações acerca das dimensões e parâmetros do motor.

3.5.5 Driver do motor DC

No que toca ao driver do motor DC, foi inicialmente utilizado o driver do motor passo a passo utilizando as ligações por PWM (Pulse Width Modulation) representado na figura 3.11. No entanto, verificou-se uma queda significativa da tensão à saída dos terminais do driver, deste modo, foi então necessário adquirir outro driver. A compra do novo driver teve como principais critérios o custo e a corrente máxima suportada em funcionamento contínuo (superior a 5 A). Assim foi adquirido um driver da série *DRI0042* da distribuidora *dfrobot* (figura 3.16) cujas características se encontram na tabela 3.2.

Tabela 3.2- Propriedades do Driver, DRI0042 [25]

Tensão da fonte de alimentação	12 a 36 V DC
Tensão do sinal de comando	0 a 5,5 V DC
Corrente máxima em serviço contínuo	12 A (sem dissipador de calor), 15 A (com dissipador de calor) ou 20 A (com sistema de refrigeração)
Controlo de velocidade	PWM
Largura mínima de pulso	200 ns



Figura 3.16 - Driver do motor DC, DRI0042 [25]

Através das propriedades do driver presentes na tabela 3.2 podemos observar que este driver consegue cumprir com as especificações necessárias ao funcionamento desejado para o motor (corrente em serviço contínua de 12 A).

3.5.6 Software

O software utilizado para a programação da aplicação de controlo foi o *LabVIEW 2017*. Este software recorre à linguagem de programação por blocos, sendo uma solução muito comum para a aquisição e análise de dados provenientes dos sensores presentes no sistema. Deste modo é possível controlar de uma forma rápida e eficaz todo hardware do sistema. Para além disso, um dos requisitos do sistema é a realização gráfica da interface de controlo em LabVIEW e por isso foi escolhido este software para a realização deste projeto.

3.5.7 Placa de aquisição de dados

A recolha e envio de sinais analógicos e digitais provenientes dos componentes elétricos do sistema, pode ser realizada através de várias soluções tecnológicas, como por exemplo: PLC (*programmable logic controller*), microcontroladores (por ex. Arduino), placas de aquisição de dados, entre outros. Como já foi referido anteriormente, um dos requisitos do nosso sistema é a possibilidade de simulação de uma onda sísmica a partir de um ficheiro excel, deste modo, não será possível a utilização do Arduino para tal finalidade, porque o dispositivo não possui memória suficiente para guardar toda a informação da onda.

A solução alternativa, que recorre ao uso de um PLC também foi descartada pelo facto desta solução implicar a compra de um PLC. Para além disso, a instalação do PLC no sistema implicaria a necessidade deste ser fixado junto à mesa sísmica, o que diminui a facilidade de transporte do sistema. Assim, foi utilizada uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, pois este componente apresentava-se disponível no laboratório, não sendo assim necessário a compra de um PLC.

Para o nosso sistema foi utilizada a placa *NI PCI-6221* (figura 3.17), cujas características se encontram na tabela 3.3. Esta placa funciona como interface entre um computador e sinais emitidos pelos sensores do sistema. Muitos dispositivos *DAQ* contêm outras funções para a automação de sistemas e processos de medição, como por exemplo, conversores digital-analógico (*DACs*), sinais digitais de entrada e saída e os contadores/temporizadores (contam e geram pulsos digitais) [26].



Figura 3.17- Placa *NI PCI-6221* [27].

Tabela 3.3- Propriedades da placa *NI PCI-6221*[28].

<i>NI PCI – 6221</i>	
Alimentação	5 V pela ligação PCI ao PC
Resolução do conversor ADC	16 bits
Taxa de amostragem máxima	250 kHz
Entradas analógicas	8 canais diferenciais ou 16 canais singulares
Gama de tensão de entrada	-10 a 10 V com uma exatidão de 3,10 mV
Saídas analógicas	2
Resolução conversor DAC	16 bits
Gama de tensão de saída	-10 a 10V com uma exatidão 3,23 mV
Taxa de atualização	833 kHz para um canal ou 740 kHz para dois canais
Entradas digitais	16
Saídas digitais	8
Tensão das entradas/ saídas digitais	0 a 5,25 V

Dado que a placa de *PCI-6221* contém apenas uma ligação para o exterior através de um conector de 68 pinos, foi então necessária a utilização de um módulo *NI SCB-68* (figura 3.18) por forma a realizar as ligações às componentes eletrónicas exteriores.

Figura 3.18- Modulo de ligação *NI SCB-68* [29].

É de referir que a placa *PCI-6221* foi utilizada neste projeto numa fase inicial pois estava disponível no laboratório, no entanto para o projeto final será utilizado uma placa *NI USB-6008*. A placa 6008 tem várias vantagens: possui uma ligação USB permitindo o seu uso em portáteis, é mais pequena, apresenta um custo mais reduzido e dispensa o módulo *NI SCB-68* dando por isso ao sistema maior portabilidade.

3.5.8 Fonte de alimentação

Para o nosso circuito de potência é necessário o uso de uma fonte de alimentação por forma a fornecer energia a todas as componentes do circuito, nomeadamente ao motor. A fonte de alimentação (figura 3.19) utilizada para o nosso projeto é uma fonte da série *S-150-24* da *MEAN WELL* cujas as características se encontram na tabela 3.4.

Tabela 3.4- Especificações da fonte de alimentação, *S-150-24* [30]

Tensão de saída	24 V DC
Corrente de saída	0 a 6,5 A
Potência de saída	156 W
Tensão de entrada	88 a 132 V AC ou 176 a 264 V AC
Corrente de entrada	3,2 A/115 V AC ou 1,6 A/230 V AC

Figura 3.19- Fonte de alimentação, *S-150-24* [30].

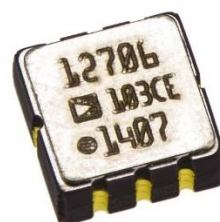
É de referir que a escolha da fonte de alimentação não foi ao acaso. Devido ao facto do driver do motor não ser capaz de limitar a corrente que é fornecida para o motor, deve ter-se o cuidado de escolher uma fonte de alimentação cuja a corrente máxima fornecida não ultrapassasse a corrente máxima que motor suporta (7,2 A).

3.5.9 Acelerómetro

Por forma a monitorizar a plataforma e a estrutura a ensaiar, foram colocados dois acelerómetros. A escolha dos acelerómetros teve como critérios o custo reduzido e a facilidade de comunicação com o *DAQ*. Para o nosso sistema foram utilizados dois acelerómetros, um da série *ADXL 103* da *ANALOG DEVICES* (figura 3.20) e outro da série *LIS3L06AL* da *STMicroelectronics* (figura 3.21), sendo o primeiro colocado no tampo da plataforma sísmica e o segundo colocado na estrutura a ensaiar. As características dos acelerómetros encontram-se na tabela 3.5 e na tabela 3.6.

Tabela 3.5- Especificações do acelerómetro *ADXL103* [31].

Tensão de alimentação	5V
Sensibilidade	1000 mV/g
Valor de aceleração máxima	1,7 g
Frequência de ressonância do sensor	5,5 kHz

Figura 3.20- Acelerómetro, *ADXL 103* [31].Tabela 3.6- Especificações do acelerómetro *LIS3L06AL* [32]

Tensão de alimentação	5V
Sensibilidade	1000 mV/g
Valor de aceleração máxima	2 g
Frequência de ressonância do sensor	1,5 kHz

Figura 3.21- Acelerómetro, *LIS3L06AL* [32].

3.5.10 Sensor de deslocamento

Tal como foi referido inicialmente, foi necessária a utilização de um sensor de deslocamento, devido à necessidade de obter informação acerca da posição da mesa em cada instante.

Tendo em consideração a gama de deslocamentos pretendida ($\approx 20\text{mm}$) optou-se por transdutores com contacto. Os mais comuns são os transdutores potenciométricos e os LVDT (*Linear Variable Diferencial Transformer*). O LVDT tem boa linearidade e excelente resolução para um curso reduzido, mas apresenta duas grandes desvantagens, sendo a primeira o seu custo e a segunda o condicionamento de sinal complexo necessário ao seu funcionamento. Deste modo foi selecionado o transdutor potenciométrico linear, devido à sua simplicidade de construção, condicionamento de sinal simples e custo bastante reduzido, comparativamente aos LVDT.

O transdutor selecionado foi o GEFTRAN PZ34 – S – 125 (figura 3.22), adquirido à F. Louro. As suas especificações podem ser observadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7- Especificações do transdutor [33]

Deslocamento (elétrico/mecânico)	(125/130) mm
Resistência	5 k Ω
Tensão máxima de funcionamento	60 V
Comprimento do corpo	183,5 mm



Figura 3.22- Transdutor potenciométrico, GEFTRAN PZ34 – S – 125 [33].

Como se pode observar, o transdutor pode ser alimentado até 60 V, mas por forma a simplificar a aquisição de sinal e não introduzir elementos extras de potência, optou-se por usar a saída de 5V proveniente do dispositivo de aquisição de sinal.

3.5.11 Sensores fim de curso

Por forma a garantir alguma segurança ao longo das sucessivas simulações, foram implementados dois sensores de fim de curso (figura 3.23), localizados junto a cada um dos apoios do fuso esferas. Estes foram implementados por forma a avisar o sistema de controlo que o limite máximo do seu movimento foi atingido.

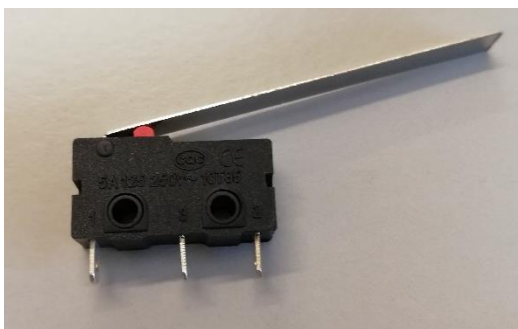


Figura 3.23- Sensor fim de curso

4 Desenvolvimento do *software*

Neste capítulo pretende-se mostrar todas as etapas envolvidas na criação da interface para o utilizador, desde a caracterização dos componentes elétricos, nomeadamente os sensores, até à programação propriamente dita.

4.1 Caracterização dos sensores

Antes da apresentação do software, há que se ter em conta a integração dos sensores no sistema, deste modo foi necessário obter a sua função característica.

4.1.1 Transdutor potenciométrico

Por forma obter a característica do transdutor de posição, este foi alimentado com uma tensão de 5V proveniente do pino 14 do módulo de ligação *NI SCB-68*, e a saída do transdutor foi lida com um multímetro, para diferentes posições da sua haste tendo-se chegado à equação(4.1).

$$x = -26,042 \times V + 131,771 \quad (4.1)$$

Onde,

x – Posição do transdutor [mm]

V – Tensão de saída do transdutor [V]

Dado que o transdutor apresenta uma resolução infinita, assim é apenas limitada pelo conversor A/D da placa de aquisição de dados, deste modo sendo o curso do transdutor 125 mm para um conversor A/D de 16 *bits*, a resolução teórica da posição será dada por:

$$Resolução = \frac{125}{2^{16}} = 0,002 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Ao longo dos testes notou-se um elevado ruído na saída do transdutor potenciométrico para o DAQ, com uma tensão pico a pico $V_{pp} = 18,6 \text{ mV}$, ou seja $\approx 0,48 \text{ mm}$.

Foi então necessário dimensionar e aplicar um filtro ao sinal por forma a limpar o sinal antes da sua aquisição figura 4.1).

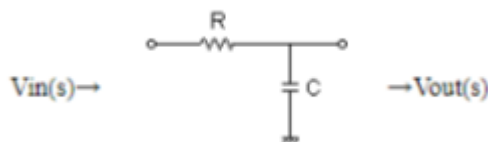


Figura 4.1- Esquema elétrico de um filtro passa-baixo [34].

A combinação de resistência (R) e condensador (C) dá a constante de tempo ($T = RC$) do filtro, a frequência de corte é determinada através da constante de tempo da seguinte forma:

$$f_c = \frac{1}{2\pi T} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.3)$$

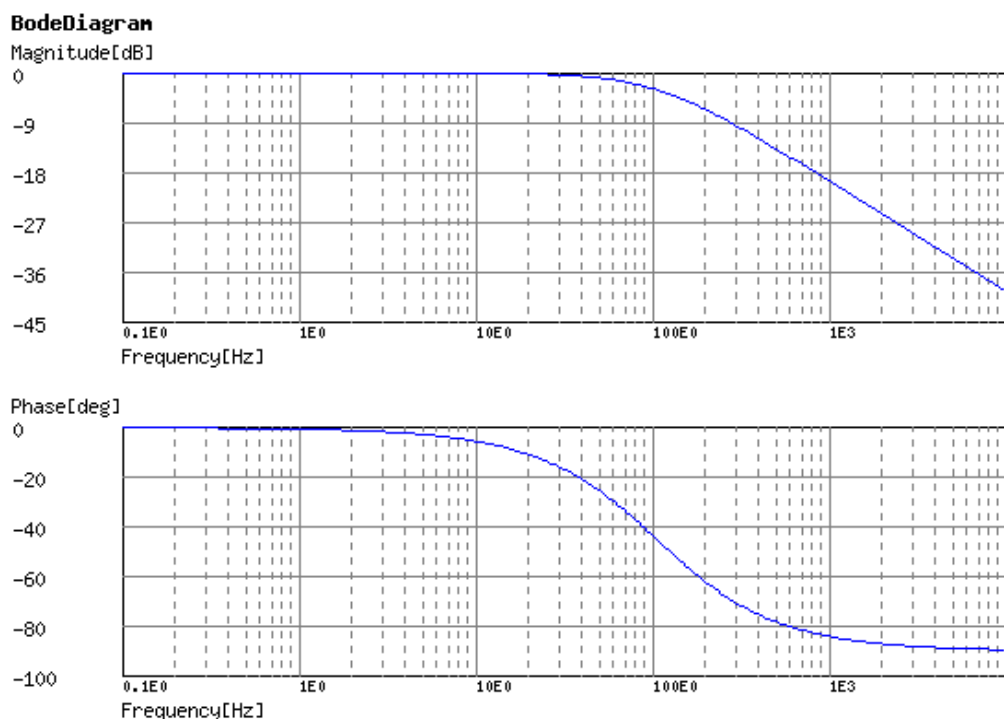
Onde,

f_c – Frequência de corte [Hz]

R – Resistência [Ω]

C – Capacitância [F]

Para o caso em estudo a frequência de corte escolhida foi de 100 Hz, obtendo-se um valor para R de 1.5 k Ω e para C de 1 μ F e com a ajuda de uma *web tool* [34] foi possível obter o diagrama de Bode (figura 4.2).



(c)okawa-denshi .jp

Figura 4.2- Diagrama de Bode do filtro [34].

Como se pode observar, a fase para baixas frequências é próxima de 0°. À volta da frequência de corte esta passa para 45° e para as altas frequências tende para 90°.

Após a aplicação do filtro a tensão pico a pico do sinal do transdutor diminuiu de 18,6 mV para 11 mV.

4.1.2 Acelerómetro

As características dos acelerómetros 1 e 2 são dadas respetivamente pelas equações (4.4) e (4.5):

$$a_1 = V - 2,5 \text{ [g]} \quad (4.4)$$

$$a_2 = V - 2,5825 \text{ [g]} \quad (4.5)$$

Tendo em conta que a resolução do conversor A/D é de 16 *bits* e a gama de tensão varia de 0 a 5 V, tem-se uma resolução na medição de tensão 0,076 mV. Assim, as resoluções dos acelerómetros 1 e 2 serão dadas pelas equações (4.6) e (4.7).

$$Resolução_1 = 0,076 \times \frac{1,7}{5} = 2,59 \times 10^{-5} \text{ [g]} \quad (4.6)$$

$$Resolução_2 = 0,076 \times \frac{2}{5} = 3,05 \times 10^{-5} \text{ [g]} \quad (4.7)$$

4.2 Software e interface gráfica

Nesta secção pretende-se mostrar a programação necessária à criação do *software* de controlo e integração dos vários dispositivos. Como já foi mencionado, para esta tarefa será usado o *software LabVIEW*, mostrando-se também a interface gráfica criada e que permite ao utilizador a interação e a visualização em tempo real dos dados obtidos na simulação.

4.2.1 Interface gráfica e de controlo

A interface do utilizador surge da necessidade de visualizar e controlar parâmetros do sistema por forma a facilitar o controlo de todos os dispositivos constituintes do sistema. Esta permitirá atuar sobre os estados das variáveis do sistema e observar os dados recolhidos pelos diversos sensores.

Para o controlo e comando do sistema foram criados três menus, cujos estados e as respetivas transições estão representados na figura 4.3. O comportamento de cada estado, bem como os detalhes da programação serão apresentados ao longo desta secção.

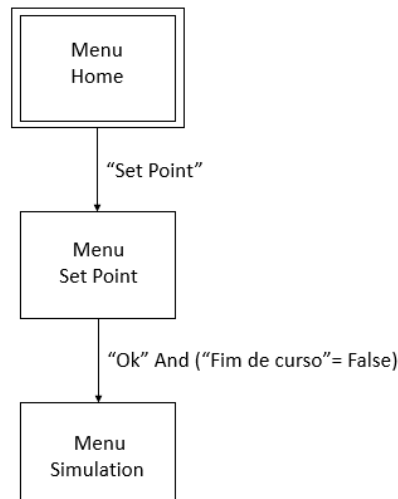


Figura 4.3- Visão geral do comportamento do sistema.

Na figura 4.4 apresenta-se a página inicial da interface do utilizador desenvolvida para o presente projeto. O *LabVIEW* é um software pensado para aquisição de dados e, desta forma, dispõe de inúmeras ferramentas para apresentar de forma atrativa e variada a informação recolhida.



Figura 4.4- Página inicial da interface do utilizador desenvolvida.

Este *software* recorre a uma linguagem gráfica, que assenta num modelo de fluxo de dados entre blocos funcionais. Estes disponibilizam várias funções que permitem realizar diversas tarefas.

A criação de uma interface em *LabVIEW* implica duas partes. O painel frontal (*front panel*) que é uma janela na qual o utilizador poderá inserir os parâmetros necessários de acordo com a simulação pretendida e na qual serão apresentadas as informações provenientes dos sensores. Pode incluir botões, *sliders*, gráficos, indicadores, entre outros. A segunda parte é o diagrama de blocos (*block diagram*), responsável pelo controlo do sistema, onde todos os blocos funcionais estão ordenadamente ligados entre si de modo a implementar o algoritmo definido.

De notar que esta interface será usada para correr as simulações da plataforma, estando todas as opções e funcionalidades de programação do software disponíveis ao utilizador. Deste modo todas simulações realizadas e dados recolhidos do simulador terão por base esta interface.

A página inicial da interface, já referida anteriormente, conta com a apresentação e as informações técnicas do projeto. Na margem superior podemos observar o menu de navegação entre as diferentes etapas da simulação da plataforma.

No menu *Set Point* (figura 4.5), tem-se acesso à janela de visualização de dados do transdutor, podendo observar posição atual da mesa. A partir deste menu, o utilizador define a posição inicial do simulador realizando deste modo o *set point* da mesa. Para a definição do *set point*, está disponível a inserção da coordenada pretendida pelo utilizador. Esta poderá ser realizada através do *slide bar* ou através da introdução direta do valor da coordenada na *input box* sendo necessário carregar no botão Start/Pause para a sua execução. Após estar definida a posição inicial da mesa, é necessário que o utilizador pressione o botão OK para seguir para o menu *Simulation*. Para além dos parâmetros de inserção, podemos observar que existe um indicador para o fim de curso, que informa ao utilizador que a plataforma se encontra num dos limites máximos do percurso total da

plataforma, e um bloco de controlo, onde estão contemplados os ganhos de cada parâmetro do controlador. A obtenção destes ganhos será explicada em detalhe na secção 6.1.

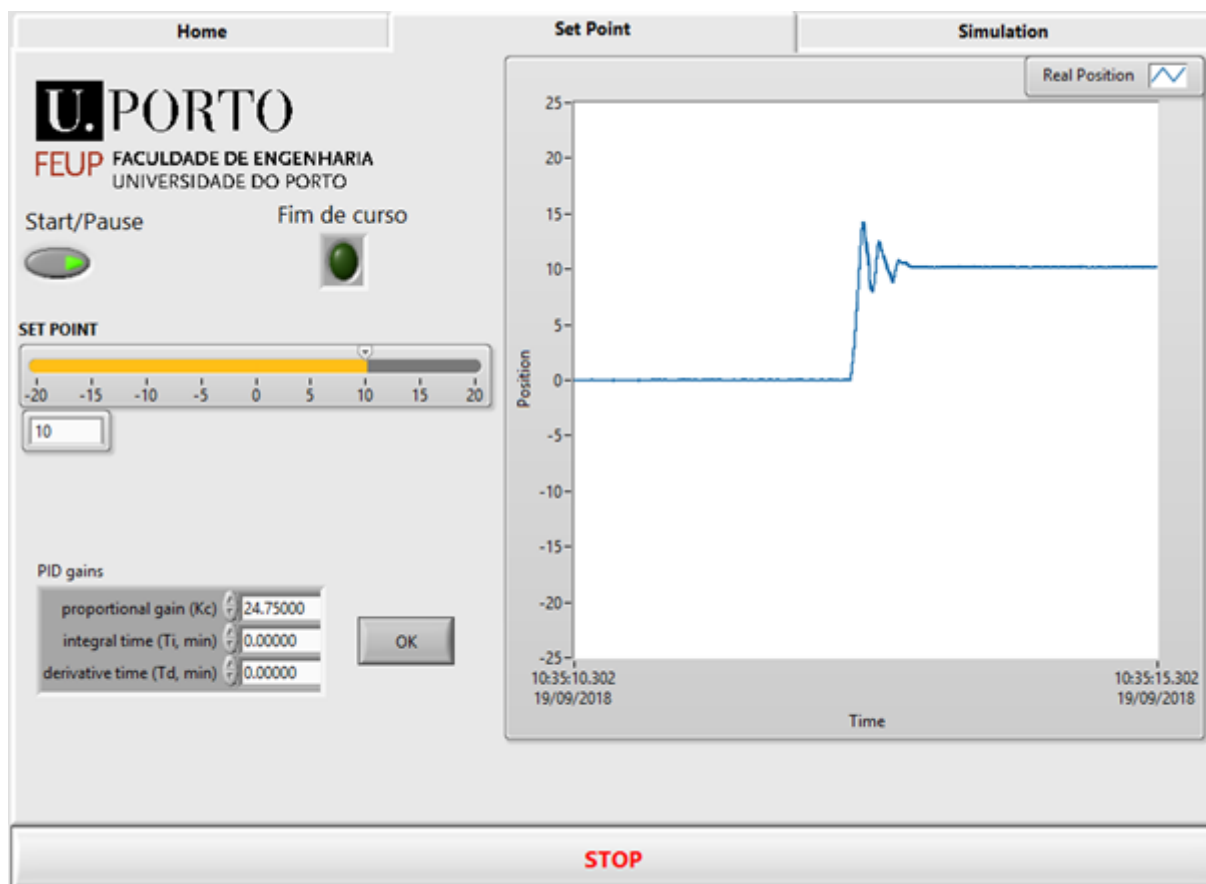


Figura 4.5- Janela do *Set Point*.

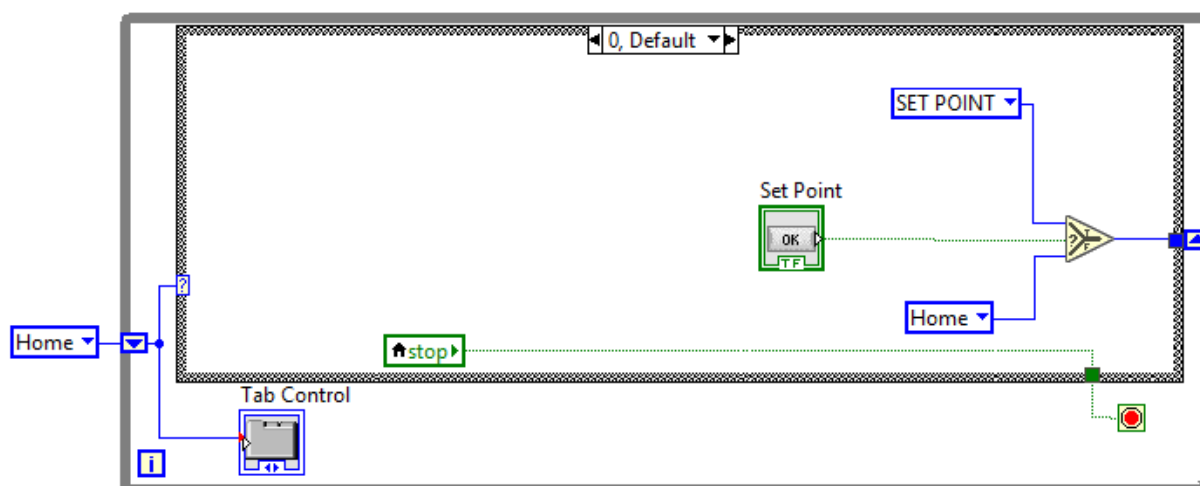
No menu *Simulation* (figura 4.6) encontra-se a interface necessária à realização da simulação propriamente dita. Por forma que a plataforma execute o movimento pretendido pelo utilizador, este terá de seleccionar o tipo movimento através da *combo box* (*Signal Type*). Para além da escolha do tipo de sinal, é necessária a introdução de alguns parâmetros tais como a amplitude, frequência, fase, offset, duty cycle e *seed* (define a repetibilidade de uma onda periódica ao longo das sucessivas simulações). É também possível inverter o tipo de onda a simular através do acionamento do *switch* com o nome *inverter*, a fração da onda a ser executada (*wave duration*) e a forma como é terminada a onda após um número inteiro de ciclos completados). É de referir que a inserção dos parâmetros mencionados anteriormente depende do tipo de onda a ser executada. No caso do utilizador querer simular uma onda personalizada, este terá de seleccionar no *Signal Type* a opção *Custom Duration* e acionar o botão *Upload*.

Após a seleção do tipo de onda através do *Signal Type* e a inserção dos parâmetros correspondentes, é necessário que o utilizador comute o *switch Start* por forma a iniciar a simulação, podendo parar a simulação através do *switch* com o nome *Pause* ou através do botão de emergência *STOP*.

Através deste menu, o utilizador poderá visualizar no decorrer da simulação o gráfico que compara o movimento realizado pela plataforma vibratória com o movimento pretendido e os gráficos onde são apresentados os valores da aceleração da mesa e da estrutura em cada instante.

No que toca ao controlo automático do movimento da plataforma, é utilizado um controlador proporcional, cujos valores serão apresentados na secção 6.2.

O funcionamento em modo contínuo desta interface é assegurada por um ciclo *while* onde se encontram os blocos necessários à aquisição, processamento e geração de sinais. Este pode ser observado no anexo D, sendo demonstradas algumas das características deste ao longo desta secção. O menu de navegação é controlado a partir de um *case structure* que assegura a mudança entre as diferentes janelas do menu de navegação quando é atuado o botão referente à mudança de página (figura 4.7).



No diagrama de blocos do menu *Set Point* (figura 4.8) podemos observar que a aquisição do sinal do transdutor é realizada através do uso do bloco *DAQ Assistant* com o nome *TRANSDUCER*, onde posteriormente é introduzida a sua função característica. Seguidamente, este sinal é enviado para um bloco funcional do controlador PID, onde é possível observar os blocos que definem os

seus parâmetros. A ação de controlo resultante do bloco funcional do controlador PID é enviado para um gerador de pulsos, definindo o *duty cycle* da onda a ser gerada, que posteriormente é enviada para o bloco *DAQ Assistant PWM* que está responsável por gerar o sinal digital que será emitido para o conversor D/A, presente no DAQ, gerando este o sinal analógico necessário para o comando da velocidade do motor. Quanto ao comando do sentido de rotação do motor, este é realizado através de um *case structure* que envia uma dada informação digital para o bloco *DAQ Assistant* denominado *DIRECTION* de acordo com o sinal da ação de controlo (positiva ou negativa) resultante do bloco funcional PID.

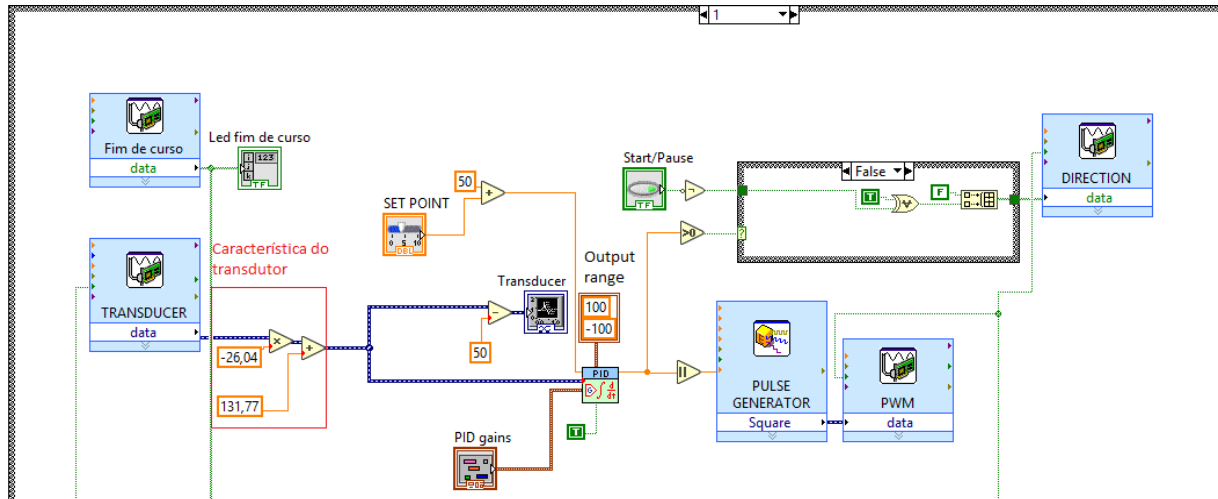


Figura 4.8- Parte do diagrama de blocos do *case structure* responsável pelo *Set Point*.

No diagrama de blocos do menu *Simulation* a lógica de comando do motor é semelhante ao caso do diagrama de blocos do menu *Set Point* explicado anteriormente, sendo que neste caso a aquisição de sinais é feita para os três sinais (1 transdutor e 2 acelerómetros) em simultâneo, sendo utilizado o bloco *Sensors* para a realização desta tarefa. Posteriormente os sinais são separados e são lhes aplicados as respetivas funções características. Para o controlo automático da mesa, é utilizado um *Formula Node*, por forma a enviar o respetivo valor do K_p , de acordo com frequência e amplitude a simular, para bloco funcional do controlador PID. Por forma a simular os diferentes tipos de ondas, foi criado um *SubVI* que gera as sucessivas referências para os diferentes tipos de funções. Posteriormente essas referências são enviadas para bloco de funcional do controlador PID através de um ciclo *for*.

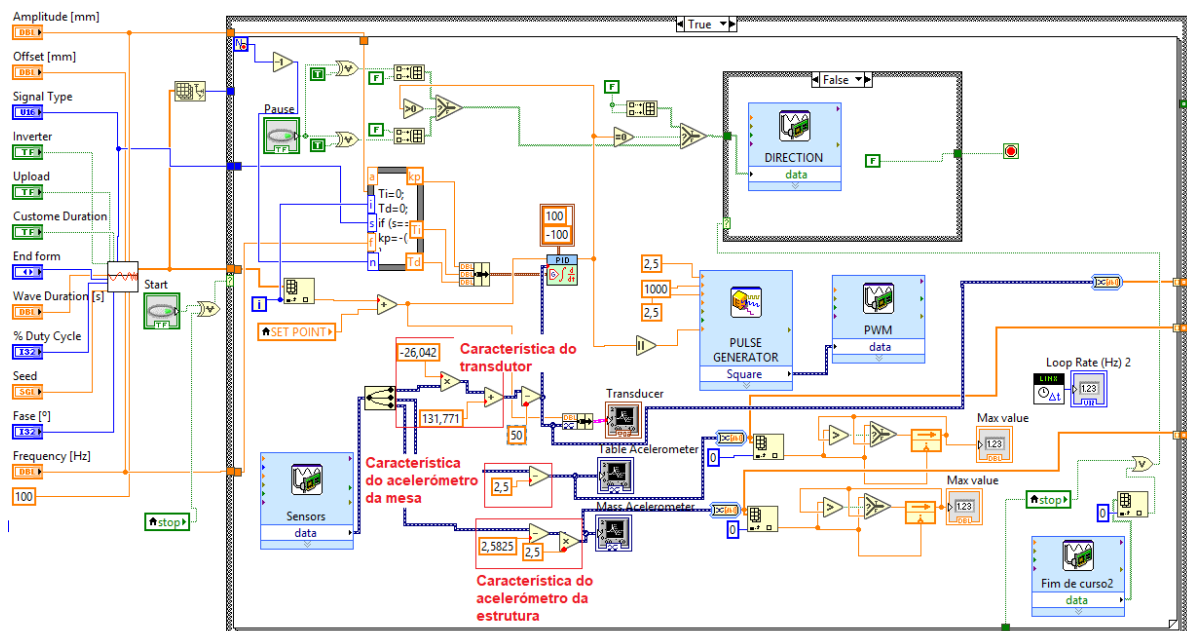


Figura 4.9- Parte do diagrama de blocos do *case structure* responsável pelo *Simulation*.

Para uma melhor compreensão da lógica de comando, é apresentado um *Grafcet* comportamental (figura 4.10), onde se consta as principais etapas e transições.

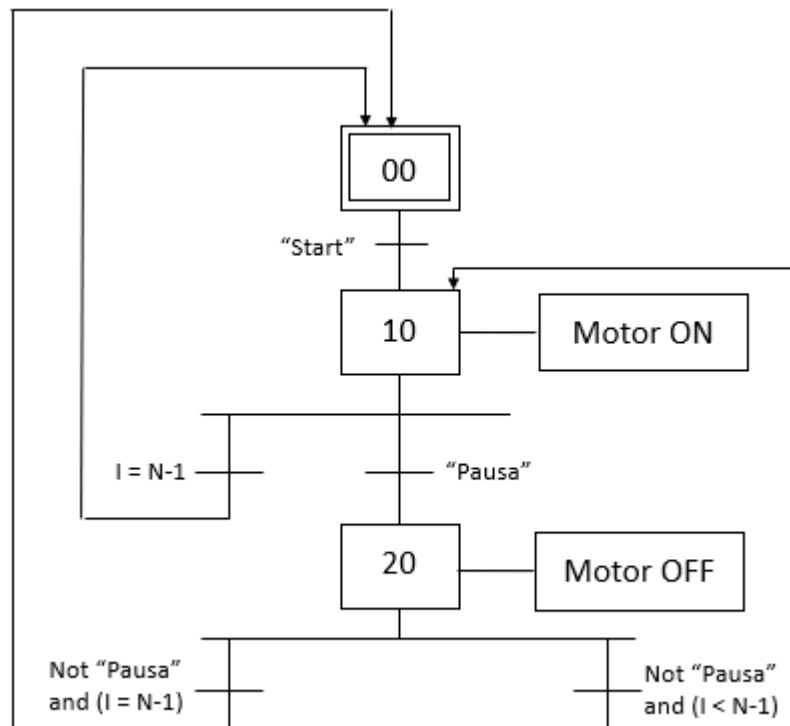


Figura 4.10- Grafcet comportamental da interface.

Na etapa 00, a mesa encontra-se parada e o utilizador deverá introduzir os dados relativos à onda a simular, sendo necessário acionar o botão *Start* para iniciar a simulação.

Na etapa 10, o motor entra em funcionamento contínuo dentro do ciclo *for*, podendo ser parado após o fim do ciclo *for* ($I = N-1$) e com o botão *Start* desligado ou através da comutação do botão *Pause*. É de referir que o número de ciclos (N) a realizar para um determinado tipo de onda depende do seu período, ou do valor do *Wave Duration*. A razão pela qual o fim ciclo terminar em $N-1$ deve-se ao facto da iteração do ciclo (I) começar no 0.

Por fim, na etapa 20, a plataforma permanece imóvel até que seja desativado o *switch Pause*. É de mencionar que apesar do motor não se encontrar a rodar, o ciclo *for* encontra-se ativo.

Todos dados adquiridos ao longo da simulação são guardados automaticamente para um ficheiro no formato *Microsoft Excel* com ajuda do bloco *Write to Measurement File* (figura 4.11).

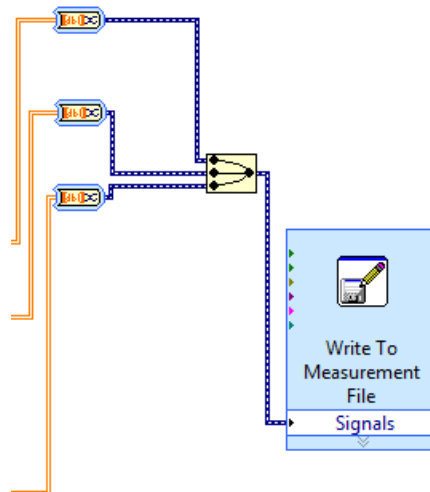


Figura 4.11- Bloco funcional de exportação de dados.

O SubVI responsável por gerar os diferentes tipos de ondas (figura 4.12) apresenta um diagrama de blocos baseado numa *case structure*, onde contém ondas do tipo sinusoidal, triangular, quadrada, dente de serra. Para além das ondas predefinidas, existe ainda a possibilidade do utilizador inserir uma onda a partir de um ficheiro *Excel*.

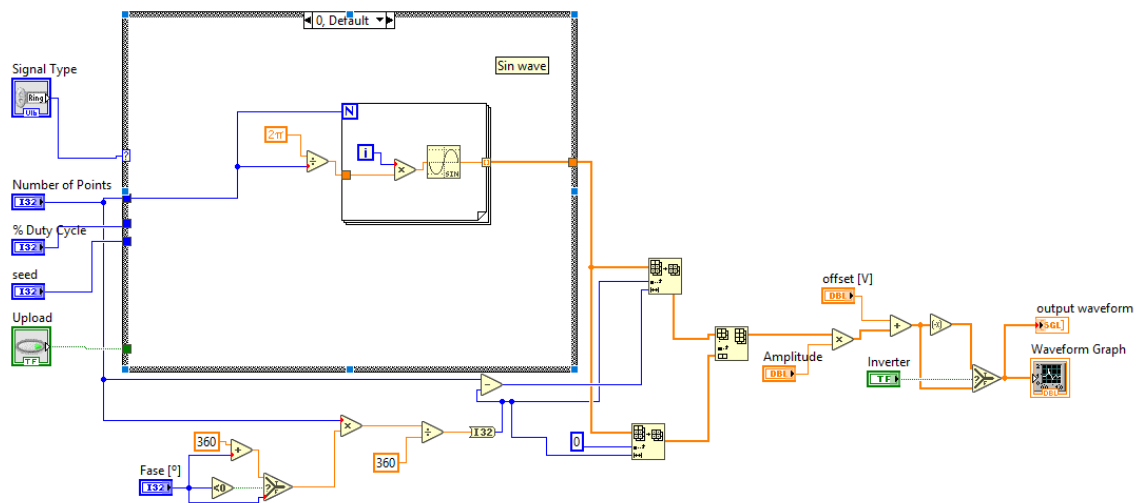


Figura 4.12- Diagrama de blocos do gerador de funções

5 Análise do modelo sísmico

Após a criação do software de simulação, o passo seguinte impôs-se naturalmente: o ensaio dum modelo sísmico.

Para o efeito, foi criado um modelo bastante simples (figura 5.1) que consiste na utilização de um barra de alumínio que contém numa das suas extremidades uma bola de ténis.



Figura 5.1- Modelo sísmico utilizado.

Para a fixação do modelo à plataforma sísmica foi criado um suporte num modelo em impressão 3D (figura 5.2) cujas dimensões se encontram no anexo E.

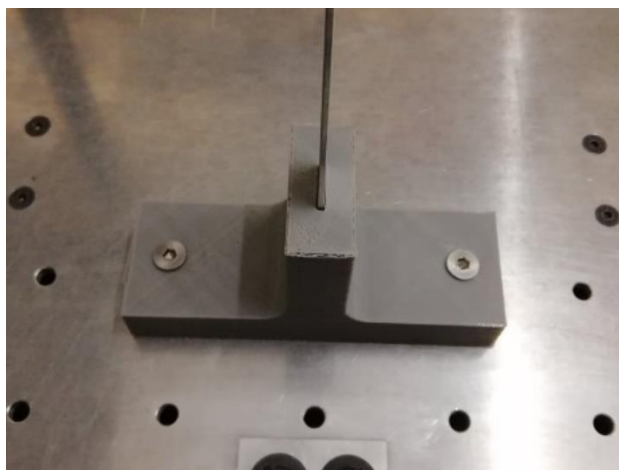


Figura 5.2- Suporte do modelo.

Após a construção e fixação do modelo à plataforma, foi necessário realizar os cálculos por forma a obter a frequência fundamental do modelo (1º frequência natural). Deste modo, foi considerado o seguinte modelo simplificado representado na figura 5.3.

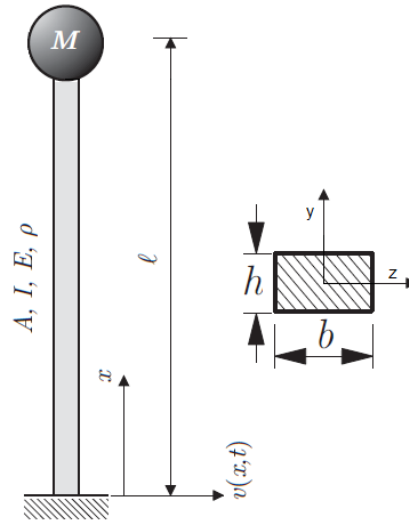


Figura 5.3- Modelo simplificado da estrutura [1].

Onde,

$$m_{bola} = 58,02 \text{ g}$$

$$\Phi_{bola} = 0,063 \text{ m}$$

$$E = 69 \text{ GPa}$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 0,722 \text{ m}$$

$$b = 0,015 \text{ m}$$

$$h = 0,002 \text{ m}$$

Para a estimativa da 1ª frequência natural do sistema foi considerado o modelo de ensaio como sendo um modelo de massa concentrada. Contudo, devido ao facto da bola não apresentar uma massa significativamente superior à massa da barra de alumínio, foi então necessário contabilizar o efeito da massa da barra para o cálculo da 1ª frequência natural. Deste modo, dividiu-se a massa da barra em metade do seu valor para os nós adjacentes, por forma a obter uma boa aproximação para o cálculo da 1ª frequência natural. Para a obtenção da frequência natural (ω_n) do modelo foi utilizado a equação (5.1) [1].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{k_{barra}}{m_{bola} + \frac{m_{barra}}{2}}} \quad (5.1)$$

Onde,

$$k_{barra} = \frac{3EI_y}{L^3} = \frac{3 \times 6,9 \times 10^{10} \times 1 \times 10^{-11}}{0,722^3} = 5,5 \text{ N/m} \quad (5.2)$$

$$I_y = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{0,015 \times 0,002^3}{12} = 1 \times 10^{-11} m^4 \quad (5.3)$$

$$m_{barra} = \rho \times V_{barra} = 2700 \times 0,015 \times 0,002 \times 0,722 = 0,058 kg \quad (5.4)$$

Assim, a frequência natural vem da forma:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{K_{barra}}{(\frac{m_{barra}}{2} + m_{bola})}} = \sqrt{\frac{5,5}{(\frac{0,05848}{2} + 0,05802)}} = 7,94 rad/s \quad (5.5)$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = 1,26 Hz \quad (5.6)$$

Após a obtenção da 1ª frequência natural do modelo sísmico, foi realizada uma análise de frequências através de métodos computacionais (software *Solidworks*), por forma a ter uma melhor compreensão sobre o comportamento da estrutura de ensaio. Assim, na figura 5.4 são apresentados os resultados obtidos para a diversas frequências naturais do modelo sísmico.

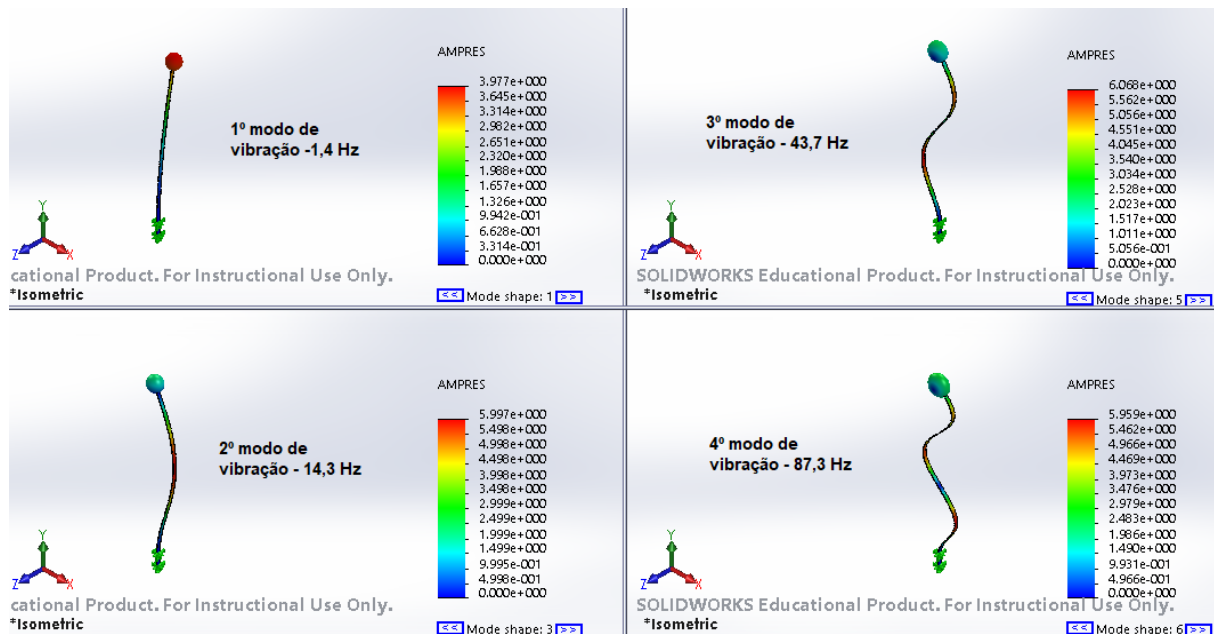


Figura 5.4- Simulação dos modos de vibração do modelo sísmico.

A partir dos resultados obtidos através da simulação em *Solidworks*, podemos observar que a primeira frequência natural obtida aproxima-se bastante do valor obtido por meio do método analítico. É de referir que a simulação não contempla todas as características do modelo sísmico, assim, os valores obtidos servem apenas como uma orientação para o intervalo de frequências na qual se espera ver os diferentes modos de vibração. Contudo, do ponto de vista prático e didático, apenas nos interessa saber o valor a que ocorre a 1ª frequência natural, pois a estrutura comporta-se como um sistema de 1 grau de liberdade.

6 Análise e discussão de resultados

Neste capítulo irá ser realizada uma exposição sobre a forma como foram obtidos os valores para os ganhos dos controladores para cada menu, bem como a resposta do sistema face aos parâmetros de controlo obtidos. Posteriormente será feita uma exposição do comportamento dinâmico do modelo sísmico face a determinadas solicitações. Por último serão apresentados alguns comentários relativamente ao comportamento do sistema obtido.

6.1 Desenho do controlador

Antes de passarmos ao cálculo dos parâmetros do controlador, é necessário entender a interação do controlador com o sistema (figura 6.1). Deste modo, será feita uma breve descrição sobre a estratégia de controlo utilizada.

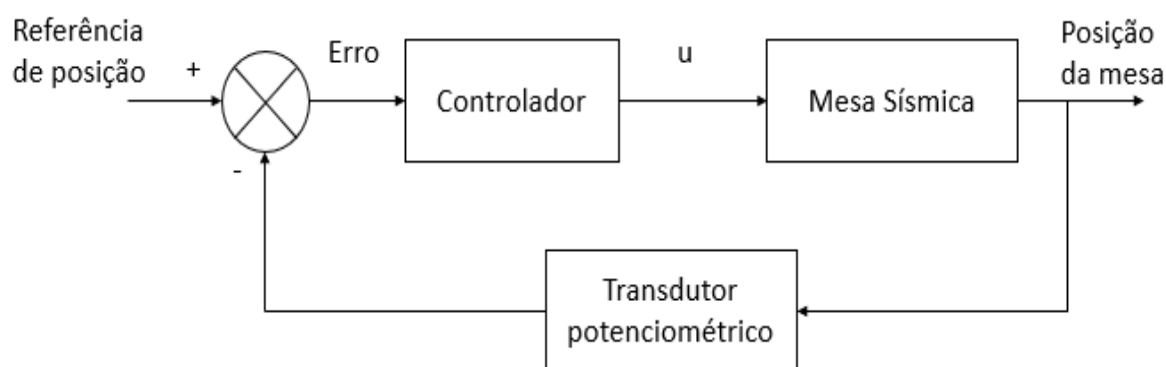


Figura 6.1- Esquema do diagrama de blocos.

Para que o sistema realize o movimento desejado, são enviadas ao bloco de controlo várias referências com uma frequência de amostragem de 100 Hz, a partir da qual é emitida uma ação de controlo (u) para o driver do motor que irá variar a velocidade do motor. Por forma a controlar o sistema em malha fechada foi utilizado um transdutor de posição que envia a informação da posição da mesa que posteriormente é comparada com a referência da posição exigida e é fornecido ao controlador.

O ajuste do controlador foi efetuado usando o segundo método de Ziegler–Nichols para sistemas em malha fechada. Para executar esta tarefa, colocaram-se os parâmetros, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, aumentando-se K_p desde 0 até atingir K_{cr} , ganho último do sistema, no qual este responde com uma oscilação constante. Nesse momento foi medido o período de oscilação T_{cr} e na tabela 6.1 são apresentados os ganhos a aplicar ao controlador *PID* final.

Tabela 6.1- Valores de ajuste do segundo método de Ziegler–Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$1/1,2 T_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 T_{cr}$	$0,125 T_{cr}$

Após submeter o sistema a diferentes valores de K_p obtiveram-se um $K_{cr} = 55 \text{ mm}^{-1}$ para $T_{cr} = 144 \text{ ms}$, após a obtenção desses valores, o passo seguinte foi escolher o tipo de controlador a utilizar. Dado que o transdutor de posição apresenta bastante ruído, mesmo na presença do filtro passa-baixo, deste modo foi descartado a opção de utilizar um controlador *PID* pois a ação derivativa é muito sensível às variações de referência provocadas pelo ruído. Assim, foi necessário escolher entre o uso de um controlador do tipo *P* ou *PI*. Para o controlador *P*, obteve-se $K_p = 27,5 \text{ mm}^{-1}$ e para controlador *PI*, obteve-se o valor $K_p = 24,75 \text{ mm}^{-1}$ e $T_i = 120 \text{ ms}$. Usando estes valores, realizaram-se os ensaios para quatro referências de posição. Apresentando-se apenas o ensaio para a referência de 60 mm (figura 6.2).

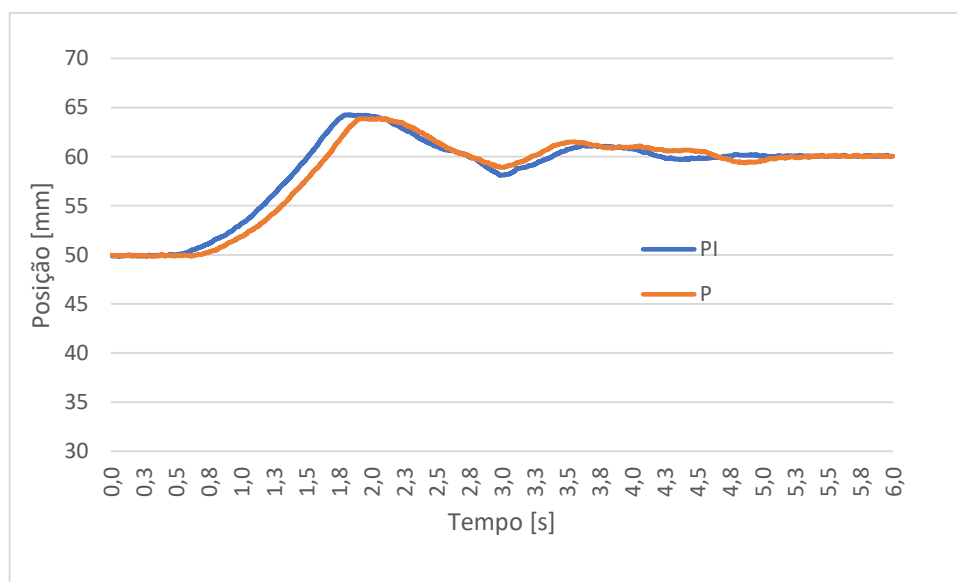


Figura 6.2- Representação gráfica da resposta da mesa com o controlador P e PI.

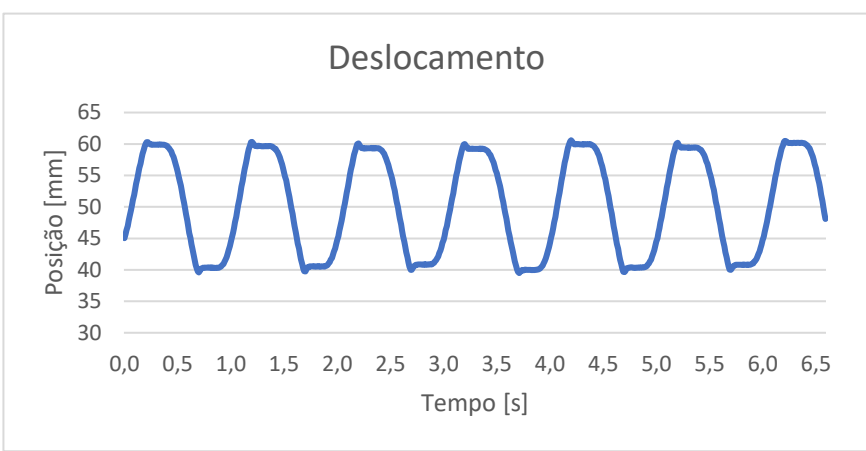
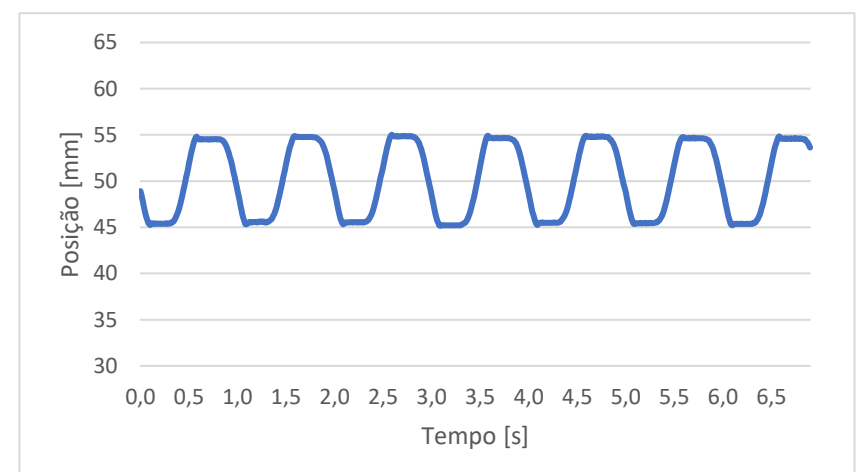
A partir da figura 6.2 podemos observar que a resposta do sistema recorrendo aos dois tipos de controladores é idêntica, pelo que se escolheu um controlador proporcional, por permitir um tempo de ciclo menor.

6.2 Resposta a uma onda sinusoidal

Para o controlo foi utilizado um controlador do tipo *P*, onde os valores dos ganhos foram obtidos por via experimental. Assim, para o controlo automático do menu *Simulation* foi necessário obter os valores dos ganhos do controlador para diferentes amplitudes e frequências. Assim, foi definido para um intervalo de frequências que varia desde 1 até 5 Hz e um intervalo de amplitudes que varia de 4 a 10 mm.

Na tabela 6.2 são mostradas as respostas do sistema para uma frequência de 1 Hz para as diferentes amplitudes e os correspondentes ganhos do controlador (K_p) utilizado.

Tabela 6.2- Resposta da mesa para uma simulação de 1 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude [mm]	Resposta
4,5	10	
5,8	5	

Através da tabela 6.2 podemos observar que a resposta do sistema para uma simulação de 1 Hz apresenta algumas limitações, nomeadamente na forma do pico da onda sinusoidal onde se apresenta como uma reta horizontal, isto deve-se ao facto do motor presente na mesa não ter capacidade de resposta para o binário requerido a baixas velocidades. Outro aspeto a notar é o facto da diminuição da amplitude causar um aumento do Kp , o que à primeira vista parece contraditório, pois para uma amplitude menor a velocidade exigida para o motor será menor o que implica que a ação de controlo tomara valores inferiores. No entanto, ao realizar as sucessivas simulações, com um Kp correspondente à amplitude de 10 mm ($Kp = 4.5$), para diferentes amplitudes de onda reparou-se que a amplitude da resposta da mesa mostrava um desfasamento considerável (≈ 3 mm), causada, tal como referido anteriormente, pela limitação de funcionamento do motor a baixas velocidades, deste modo foi necessário aumentar o valor de Kp à medida que a amplitude diminui.

Por forma a validar a estratégia usada, foi realizado uma análise do erro da amplitude e frequência, utilizando 10 períodos de onda, sendo os resultados apresentados na tabela 6.3.

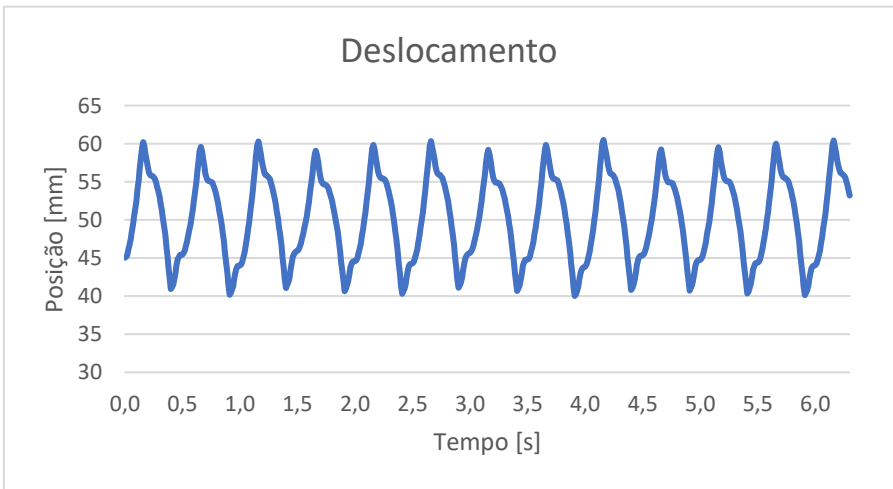
Tabela 6.3- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 1 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude teórica [mm]	Media da amplitude real [mm]	Erro relativo médio [%]	Frequência teórica [Hz]	Media da frequência real [Hz]	Erro relativo médio [%]
4,5	10	10,119	1,10	1	1,003	0,29
4,75	9	8,806	2,16	1	0,998	0,17
4,95	8	8,174	2,17	1	1,003	0,30
5,25	7	7,111	1,59	1	1,009	0,88
5,5	6	5,796	3,40	1	1,001	0,14
5,8	5	4,889	2,23	1	0,998	0,16
6,7	4	4,358	8,94	1	1,002	0,17

A partir da tabela 6.3 podemos observar que os erros associados tanto à amplitude como à frequência se mostram bastante baixos, o que indica que o comportamento da mesa se aproxima bastante dos valores teóricos exigidos.

Na tabela 6.4 são mostradas algumas das respostas do sistema para uma frequência de 2 Hz para as diferentes amplitudes e o correspondentes ganho do controlador (Kp) utilizado.

Tabela 6.4 - Resposta da mesa para uma simulação de 2 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude [mm]	Resposta
6,7	10	

Através da tabela 6.4 podemos observar que as respostas do sistema para uma frequência de 2 Hz assemelha-se bastante às respostas face a uma solicitação de 1 Hz, apresentando também um comportamento indesejável no pico da onda sinusoidal, devido à limitação de trabalho do motor a velocidades baixas. Para esta frequência, também se verifica que a diminuição da amplitude provoca um aumento de Kp .

Na tabela 6.5 são apresentados os resultados dos erros para as diferentes amplitudes para uma frequência de 2 Hz.

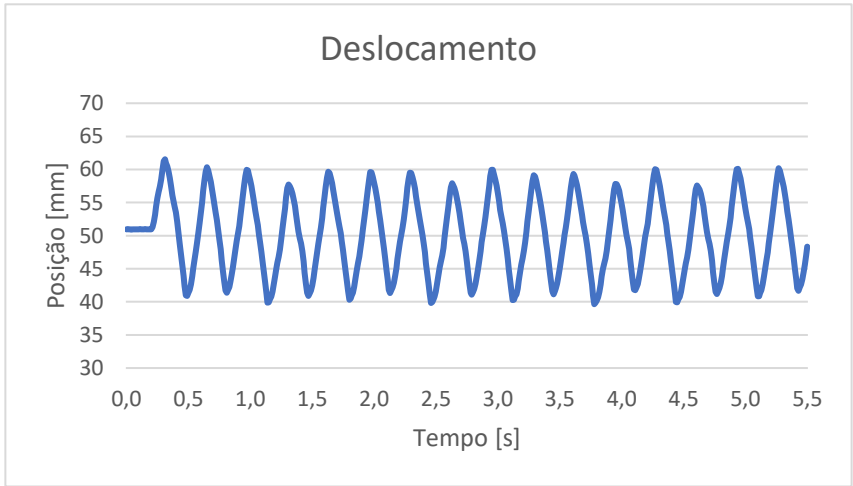
Tabela 6.5- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 2 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude teórica [mm]	Media da amplitude real [mm]	Erro relativo médio [%]	Frequência teórica [Hz]	Media da frequência real [Hz]	Erro relativo médio [%]
6,7	10	9,946	0,54	2	2,021	1,06
7,25	9	9,006	0,07	2	2,000	0,01
7,5	8	7,814	2,33	2	2,001	0,03
8,1	7	7,222	3,16	2	1,994	0,31
8,75	6	5,989	0,19	2	2,027	1,36
9,25	5	5,137	2,74	2	1,980	0,98
9,6	4	4,227	5,67	2	2,007	0,37

Da análise dos resultados obtidos a partir da tabela 6.5 podemos observar que os erros associados quer às amplitudes, quer às frequências são relativamente baixos.

Na tabela 6.6 são mostradas algumas das respostas do sistema para uma frequência de 3 Hz para as diferentes amplitudes e o correspondente ganho do controlador (Kp) utilizado.

Tabela 6.6- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 3 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude [mm]	Resposta
35	10	

A partir da tabela 6.6 podemos observar que, para uma frequência de 3 Hz, o comportamento de resposta do sistema tende para uma resposta do tipo triangular, sendo este o comportamento expectável, devido à limitação de velocidade do motor. Outro aspeto visível, é o facto de a diminuição da amplitude causar uma diminuição do Kp , este comportamento é justificado devido ao facto do motor já se encontrar a trabalhar na gama de velocidades que lhe permite vencer o binário requerido, sem a necessidade do aumento da ação de controlo por forma a vencer o desfasamento de amplitudes presente nas frequências anteriores. Assim o motor pode rodar para valores de amplitude inferiores a 10 sem a necessidade de aumentar o ganho do controlador. Por fim, podemos constatar que para valores de amplitudes inferiores à 5 mm, a resposta da mesa assemelha-se ao comportamento para uma frequência de 2 Hz.

Tal como nos casos anteriores, é apresentada na tabela 6.7 os erros associados à diferentes amplitudes de resposta para uma frequência de 3 Hz.

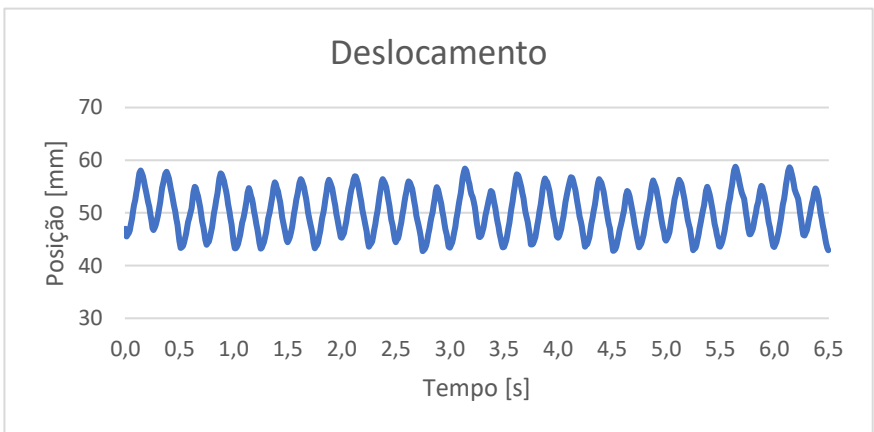
Tabela 6.7- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 3 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude teórica [mm]	Media da amplitude real [mm]	Erro relativo médio [%]	Frequência teórica [Hz]	Media da frequência real [Hz]	Erro relativo médio [%]
35	10	10,110	1,10	3	3,052	1,73
20	9	9,124	1,38	3	3,054	1,79
16	8	8,172	2,15	3	2,925	2,50
14	7	6,840	2,29	3	3,068	2,26
11	6	5,980	0,33	3	3,086	2,88
11	5	5,070	1,40	3	2,956	1,45
10	4	3,9361	1,60	3	3,059	1,96

Os valores dos erros obtidos para esta frequência são baixos pelo que podemos afirmar que o sistema simula corretamente as referências exigidas.

Na tabela 6.8 podemos observar o comportamento obtido para uma simulação de 4 Hz para 8 mm de amplitude com o respetivo ganho (Kp).

Tabela 6.8- Resposta da mesa para uma simulação de 4 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude [mm]	Resposta
35	8	

A partir da tabela 6.8 podemos observar que para as amplitudes superiores a 8 mm, o motor não é capaz de realizar o movimento pretendido, este comportamento advém do facto de o motor já ter atingido a sua velocidade máxima de rotação. Tal como no caso anterior, a diminuição da amplitude causa uma diminuição do Kp .

Na tabela 6.9 são mostrados os erros obtidos para as diferentes amplitudes para uma frequência de 4 Hz.

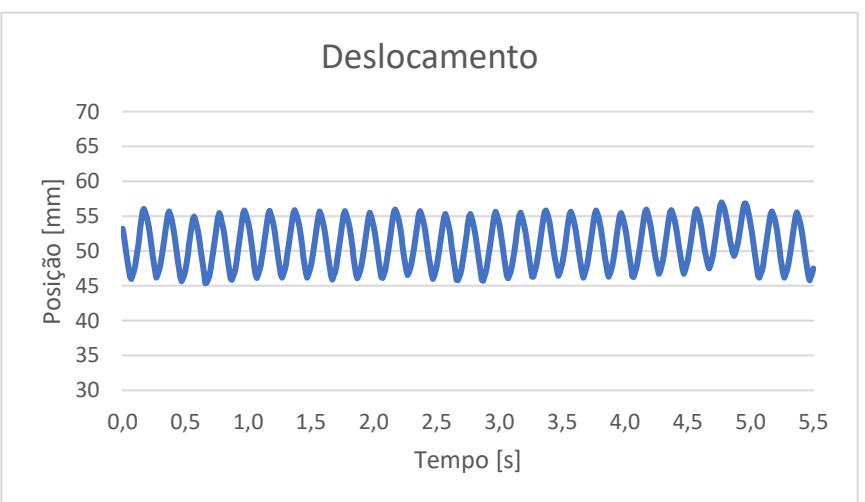
Tabela 6.9 - Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 4 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude teórica [mm]	Media da amplitude real [mm]	Erro relativo médio [%]	Frequência teórica [Hz]	Media da frequência real [Hz]	Erro relativo médio [%]
30	10	7,759	22,41	4	3,965	0,87
30	9	7,953	11,64	4	4,131	3,28
35	8	7,801	2,49	4	4,107	2,68
25	7	6,692	4,39	4	3,969	0,76
22,5	6	6,014	0,23	4	4,154	3,84
20	5	5,230	4,60	4	4,044	1,10
20	4	4,438	10,94	4	4,133	3,33

Apesar de não se conseguir atingir amplitudes superiores a 8 mm, as respostas para amplitudes inferiores a 8 mm apresentam erros baixos, pelo que podemos afirmar que o comportamento do sistema adequa ao comportamento desejado.

Por fim, foram analisadas as diferentes respostas do simulador face a uma solicitação de 5 Hz, onde o resultado mais notório é apresentado na tabela 6.10.

Tabela 6.10- Resposta da mesa para uma simulação de 5 Hz

Kp [mm ⁻¹]	Amplitude [mm]	Resposta
55	6	 <p>O gráfico, intitulado 'Deslocamento', mostra a posição em milímetros ao longo do tempo em segundos. O eixo vertical (Posição [mm]) varia de 30 a 70, e o eixo horizontal (Tempo [s]) varia de 0,0 a 5,5. A onda senoidal oscila entre aproximadamente 45 mm e 55 mm, com uma frequência de 5 Hz.</p>

Como é de esperar, a resposta para uma frequência de 5 Hz apresentará um valor de amplitude máxima exequível inferior à da resposta para uma frequência de 4 Hz. Como podemos observar a partir da tabela 6.10, face a uma solicitação de 5 Hz é apenas possível obter uma amplitude máxima de 6 mm. Tal como é de prever, para esta frequência, a diminuição da amplitude provoca uma diminuição do Kp .

Na tabela 6.11 são apresentados os valores dos erros para as diferentes amplitudes para uma frequência de 5 Hz.

Tabela 6.11- Resposta em amplitude e frequência para uma onda seno de 5 Hz

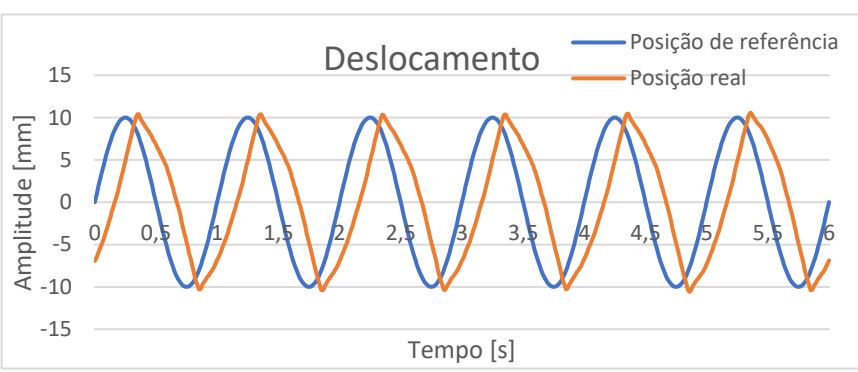
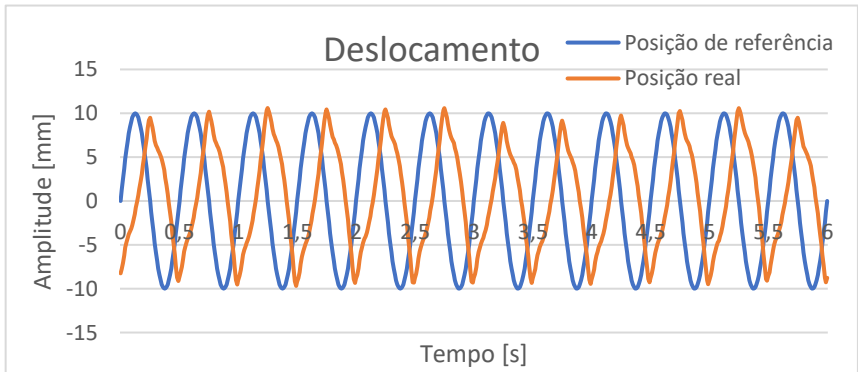
K_p [mm ⁻¹]	Amplitude teórica [mm]	Media da amplitude real [mm]	Erro relativo médio [%]	Frequência teórica [Hz]	Media da frequência real [Hz]	Erro relativo médio [%]
50	10	6,166	38,344	5	5,004	0,08
50	9	6,022	33,086	5	5,004	0,08
50	8	5,828	27,145	5	5,008	0,17
50	7	6,081	13,124	5	4,966	0,68
55	6	5,990	0,05	5	5,008	0,17
50	5	4,973	0,544	5	4,970	0,60
30	4	4,416	10,412	5	4,964	0,71

Apesar dos erros das diversas amplitudes tomarem valores elevados, a resposta da frequência do simulador toma valores bastante satisfatórios. Através da tabela 6.11, podemos observar que de modo geral os erros associados à frequência em causa são baixos (inferiores a 1 %).

Por forma a melhorar o comportamento de resposta da mesa a velocidades baixas, foi realizado um *offset* ao *duty cycle* do gerador de impulsos. Desta forma, a tensão de comando de referência passa de 0 V para o limite máximo de tensão na qual o motor ainda se encontra parado. Assim, foi determinado experimentalmente o valor para a nova referência, tendo se obtido um *duty cycle* de 25% (1,25V).

Sendo as frequências de 1 Hz e 2 Hz, as frequências nas quais as baixas velocidades têm maior influência, assim, foram analisadas as respostas dessas após a implementação da nova referência (tabela 6.12).

Tabela 6.12- Resposta da mesa com *offset*

Frequência [Hz]	Resposta
1	
2	

A partir da tabela 6.12 podemos observar que a baixas velocidades o motor já se encontra capaz de executar o movimento. Com esta nova implementação, foi possível diminuir o efeito da zona morta de funcionamento, eliminando o defeito presente no pico da onda sinusoidal.

6.3 Resposta a uma onda sísmica real

Após ter analisado a resposta do sistema face a uma onda sinusoidal, chegou o momento de analisar o comportamento da mesa perante uma onda sísmica real. Os dados da onda sísmica foram adquiridos através de um ficheiro no formato excel sendo posteriormente convertido para o formato texto por forma a que o *LabVIEW* consiga ler.

Para a escolha do valor do K_p a utilizar no controlador, foi necessário realizar inicialmente uma análise do intervalo de velocidades a que o sismo real está sujeito. Após esse procedimento, verificou-se que a gama de velocidade possui uma velocidade máxima no valor de 70,1 mm/s pelo que é bastante próximo da velocidade máxima exigida para uma onda sinusoidal de frequência 1 Hz com uma amplitude de 10 mm. No entanto, dado a limitação do motor de rodar a baixas velocidades optou-se por utilizar o K_p correspondente a uma amplitude 4 mm ($K_p = 7,8$), por forma ao sistema reagir face às baixas variações de amplitude. Na figura 6.3 podemos observar a resposta da mesa perante a simulação de um sismo real.

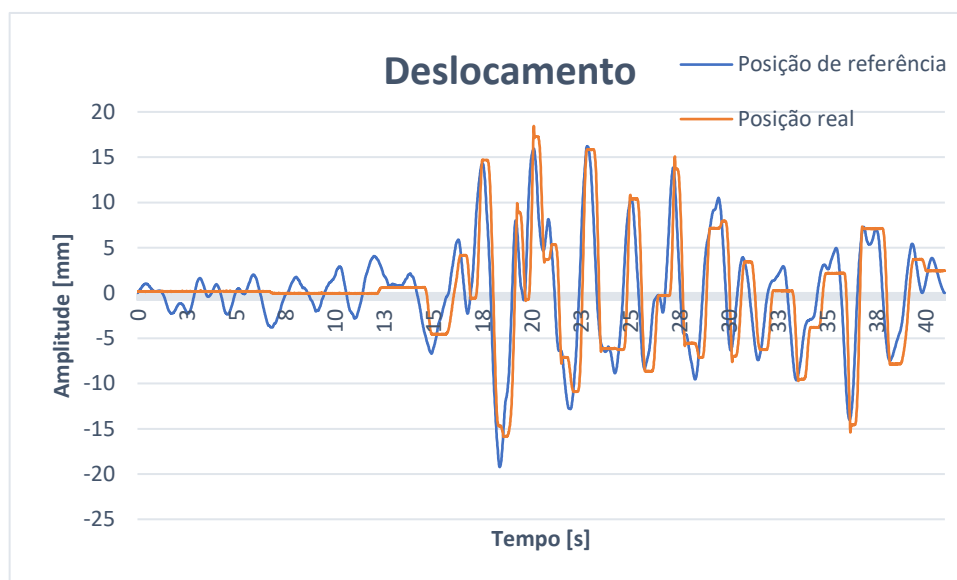


Figura 6.3- Resposta da mesa para um sismo real sem o *offset* de referência.

A partir da figura 6.3 podemos verificar que para amplitudes baixas (menores que 4 mm), a posição da mesa mantém-se praticamente imóvel devido à incapacidade de trabalho do motor a baixas velocidades. Contudo, para amplitudes superiores a 4 mm, o sistema apresenta um comportamento bastante razoável, conseguindo executar o movimento pretendido.

Posteriormente foi aplicado o offset da tensão da referência, tendo-se obtido o seguinte resultado (figura 6.4).



Figura 6.4- Resposta da mesa para um sismo real com o *offset* da referência.

A partir dos resultados obtidos, podemos verificar que, a implementação do offset contribui de forma significativa para a melhoria da resposta do sistema, em especial, para os movimentos de baixas amplitudes.

6.4 Limites de funcionamento

A partir dos resultados obtidos das simulações das várias ondas sinusoidais foi possível verificar quais são os limites de funcionamento do sistema. Na figura 6.5 é apresentado um gráfico que mostra o comportamento do sistema face às diferentes frequências.

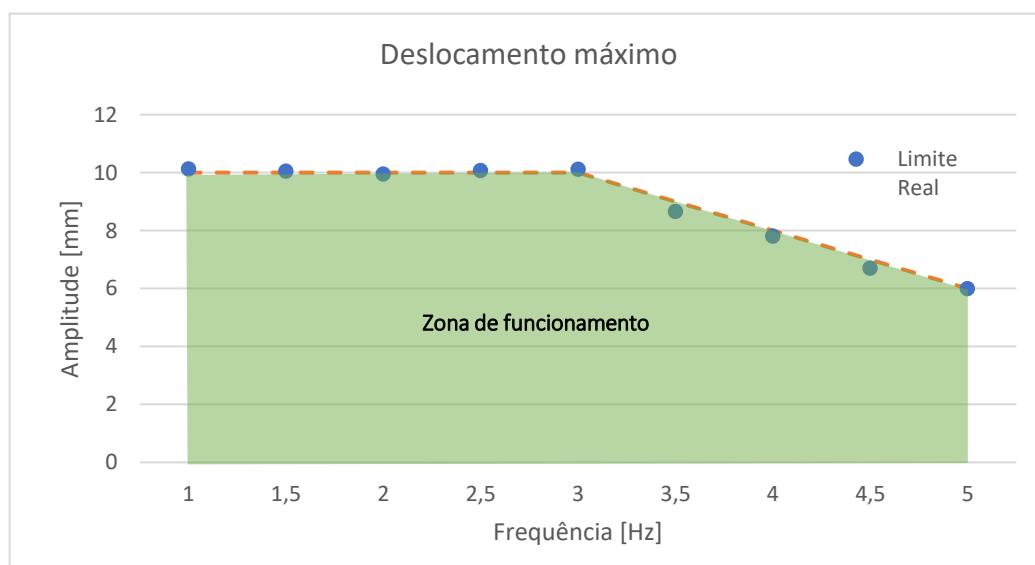


Figura 6.5- Resposta máxima em amplitude do sistema para várias frequências.

Da análise da figura 6.5 podemos observar que para valores superiores a 3 Hz, o valor máximo da amplitude de deslocamento tende a diminuir. Isto deve-se, tal como referido na secção anterior, à limitação da velocidade máxima do motor. É de salientar que para as frequências inferiores a 3 Hz, o valor máximo da amplitude toma o valor de 10 mm devido limite do curso útil do fuso de esferas presente no projeto, e não devido à incapacidade do motor.

Na tabela 6.13 é apresentado um quadro de resumo, para os valores limites possíveis de amplitude, velocidade, aceleração e frequência do nosso simulador uniaxial.

Tabela 6.13- Características dinâmicas máximas do simulador uniaxial.

Amplitude	$\leq 10 \text{ mm}$
Velocidade	$\leq 120 \text{ mm/s}$
Aceleração	$\leq 1,4 \text{ g}$
Frequência	1 - 5 Hz

Depois da análise da reposta do movimento da plataforma sísmica, segue-se por fim a análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios com o modelo de teste.

Para o efeito, foi colocado o modelo teste sobre a plataforma sísmica, tendo-se obtido o seguinte resultado (figura 6.6).

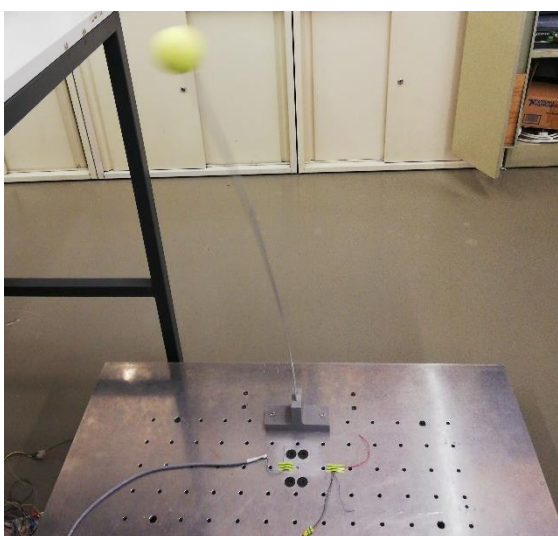


Figura 6.6- Simulação do modelo sísmico a 1,3 Hz.

Devido à limitação dos componentes presentes no sistema, nomeadamente do motor, apenas foi possível identificar a olho nu o primeiro modo de vibração, acontecendo à frequência de 1,3 Hz. Por fim, é apresentado no anexo F um conjunto de exercícios didáticos complementares, utilizando os valores obtidos pelo acelerómetro colocado na estrutura.

7 Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Neste trabalho procedeu-se ao desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos, tendo sido uma experiência extremamente rica uma vez que permitiu a integração de conhecimentos ministrados ao longo do curso (eletrónica, mecânica, controlo, etc.) e a obtenção de experiências a projetar e construir peças em impressão 3D.

7.1 Conclusões

Atualmente as plataformas sísmicas não se encontram disponíveis no mercado, no entanto grande parte dos protótipos existentes derivam de instituições académicas, que serviram de base para este trabalho. No processo de desenvolvimento foi necessário utilizar métodos analíticos e computacionais, nomeadamente programas CAD (*Solidworks*). Estes vieram possibilitar a análise dos fenómenos vibratórios da estrutura que de outra forma seria difícil, permitindo estimar os resultados obtidos num caso real.

Ao longo do trabalho foram notórias as dificuldades de controlo associados ao movimento da plataforma, nomeadamente o atrito mecânico existente no sistema provocado pelo desalinhamento da base constituída pelos perfis Bosch que servem de base de apoio ao motor. O atrito variável ao longo do curso, e acima do que seria expectável torna o processo de controlo bastante mais complexo.

No desenvolvimento do presente projeto, foi necessário a substituição do motor passo a passo por um motor DC, pois o motor passo a passo apresentava uma velocidade máxima 11 vezes inferior à velocidade requerida pelas especificações. Contudo, com esta troca conseguiu-se manter o requisito de ter uma plataforma leve e transportável.

No sistema foram implementados no total cinco sensores (2 acelerómetros, 1 transdutor potenciométrico e 2 sensores de fim de curso), onde os seus sinais são adquiridos e enviados em tempo real para interface do utilizador. Deste modo, implementou-se um sistema de aquisição de posição e aceleração da plataforma.

Para além disso, foi ainda necessário adicionar uma fonte de alimentação, um driver para comando do motor e proteções elétricas. Com o transdutor potenciométrico, o driver, o módulo de aquisição de dados e o software em *LabVIEW*, conseguiu-se realizar o controlo em malha fechada.

Desenvolveu-se ainda uma interface simples e intuitiva para o comando da plataforma por parte do utilizador, recorrendo ao software *LabVIEW*, onde o utilizador poderá escolher o tipo de solicitação (onda sinusoidal ou onda real) e inserir os parâmetros necessários à sua execução (frequência, amplitude, fase, etc.).

Após a implementação do software de comando e controlo, foi necessário verificar os limites do funcionamento do sistema. Assim, verificou-se que para simulações de ondas sinusoidais com valores de frequência inferiores a 3 Hz, o sistema apresenta uma boa resposta no que diz à trajetória pretendida, conseguindo executar valores de amplitude até 10 mm. Contudo, para valores de frequência superiores a 3 Hz, o sistema demonstra uma perda da capacidade de execução da amplitude requerida, sendo a amplitude máxima exequível de 6 mm para a frequência de 5 Hz.

Assim, foi possível cumprir com apenas uma das especificações, a frequência de simulação, não sendo conseguindo verificar a amplitude de 10 mm para a simulação.

Para além da simulação da onda sinusoidal, foi realizado a simulação para uma onda sísmica real, a partir dos dados fornecidos através de um ficheiro Excel, tendo-se obtido uma resposta bastante adequada.

Por fim, com o sistema programado, foram realizados ensaios ao modelo sísmico por forma a analisar a adequabilidade do comportamento de resposta da estrutura com o comportamento previsto, tanto pelos métodos analíticos como pelos métodos computacionais, tendo-se obtido resultados bastante satisfatórios, podendo-se observar, a olho nu, o primeiro modo de vibração da estrutura, que se encontrava a 1,3 Hz.

Desta forma, face ao trabalho desenvolvido, pode-se afirmar que os objetivos foram parcialmente cumpridos com sucesso. Não tendo conseguido cumprir com a especificação da simulação de uma onda sinusoidal para uma amplitude de 10 mm para todas as frequências até 5 Hz.

7.2 Trabalhos Futuros

Tendo em conta o desempenho do sistema, o principal objetivo em relação aos trabalhos futuros deveria ser em permitir executar o movimento oscilatório a baixas velocidades.

Para este fim sugere-se a nível eletrónico:

- Substituir o motor presente no projeto por um motor com maior capacidade de binário a baixas velocidades;
- Substituir o driver do motor por um driver capaz de controlar a corrente emitida para o motor;
- Substituir o transdutor potenciométrico por um transdutor do tipo LVDT, de modo a reduzir o efeito do desgaste do transdutor.

Seria também importante:

- Reduzir o comprimento do tampo do simulador para metade, o que provoca uma redução de um terço da massa móvel, que conseqüentemente origina um binário requerido menor (0,80 Nm), aumentando assim o desempenho do motor;
- Substituir o fuso de esferas por um fuso de esferas com maior passo, por forma a permitir a execução de velocidades superiores;
- Substituir a base constituída pelos perfis Bosch por uma chapa lisa de alumínio, por forma a reduzir o efeito do atrito causado pelos desnivelamentos da base;
- Implementar o controlo para os outros tipos de solicitações, nomeadamente dos tipos triangular, dente de serra, impulsiva, entre outros;
- Estender o atual protótipo para a realização do movimento para um segundo eixo;
- Criar uma aplicação remota que possibilita o controlo do sistema.

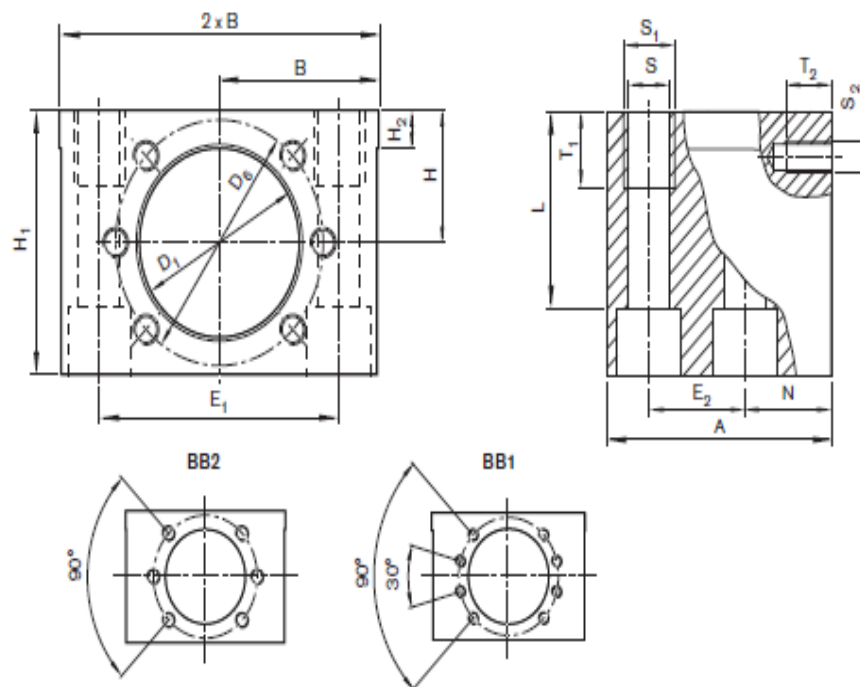
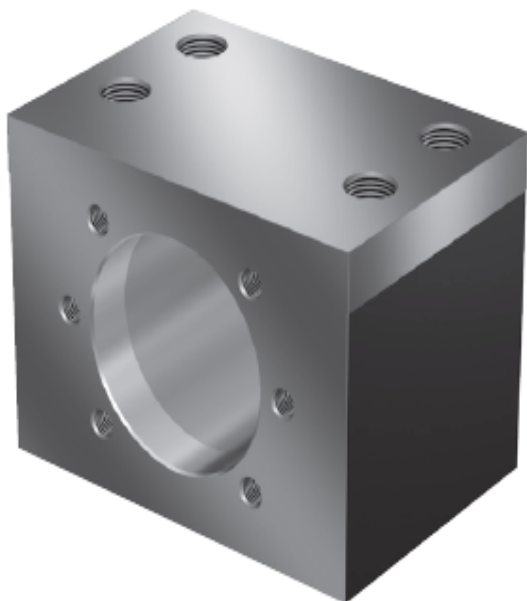
Referências

- [1] J. Rodrigues, "Apontamentos de vibrações de sistemas mecânicos " 2018, FEUP.
- [2] Expresso. (2015). "*Os dez maiores sismos de sempre*". Available: <https://expresso.sapo.pt/internacional/os-dez-maiores-sismos-de-sempre=f921928#gs.fVdbwxs>. [Accessed: Aug-2018].
- [3] NBCNEWS. (2013). "*The top 10 deadliest earthquakes in history*". Available: http://www.nbcnews.com/id/42029974/ns/world_news-asia_pacific/t/top-deadliest-earthquakes-history/#.W2wYI6inHIU. [Accessed: Aug-2018].
- [4] A. Balkhi. (2016). "*25 Worst Earthquakes In History*". Available: <https://list25.com/25-worst-earthquakes-in-history/4/>. [Accessed: Aug-2018].
- [5] F. González and J. Sabogal. (2010). *Dispositivo Para Generar Sismos A Escala*. Available: <https://es.slideshare.net/diales/dispositivo-para-generar-sismos-a-escala>. [Accessed: Mar-2018].
- [6] C. H. Esparza and R. A. Núñez, "CONTROLADOR ADAPTATIVO PD POR MODELO DE REFERENCIA PARA UNA MESA VIBRATORIA BIAXIAL BASADA EN EL MECANISMO BIELA-MANIVELA," *Información tecnológica*, vol. 25, pp. 189-202, 2014.
- [7] J. C. Cartagena and L. R. Contreras, "L. Diseño, modelamiento y simulación de una mesa sísmica unidireccional hidráulica," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Física-Mecânica da Universidade de Santander, 2011.
- [8] I. I. T. Kanpur. (2009). *Experimental Facilities for Non-Destructive Structural Dynamics*. Available: <https://www.iitk.ac.in/civil/strgrp/Experimental%20Facilities.html>. [Accessed: Mar-2018].
- [9] N. M. B. Ruiz, "Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de Estructuras," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Mecatrônica da Universidade Militar Nova Granada, 2013.
- [10] "Bench-Scales Shake Tables". PDF. Quanser Innovate educate. Available: <https://www.quanser.com/wp-content/uploads/2017/03/Shake-Tables-and-Smart-Structures-Datasheet-v1.6.pdf>. [Accessed: Mar-2018].
- [11] K. OHTANI, "Construction of a 3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility ", Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, vol. 4, no. 3 (Special Issue), 2003.
- [12] L. V. D. Einde *et al.*, "Development of the George E. Brown Jr. network for earthquake engineering simulation (NEES) large high performance outdoor shake table at the University of California, San Diego", Journal of 13th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-6, 2004.

- [13] "MTS 1.5 m Uniaxial Seismic Simulators". PDF. MTS. Available: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_002185.pdf. [Accessed: Mar-2018].
- [14] "MTS 3.0 m Biaxial Seismic Simulators". PDF. MTS. Available: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_003372.pdf. [Accessed: Mar-2018].
- [15] G. Shen, X. Li, Z. Zhu, Y. Tang, W. Zhu, and S. Liu, "Acceleration tracking control combining adaptive control and off-line compensators for six-degree-of-freedom electro-hydraulic shaking tables" *ISA Transactions*, vol.70, pp. 322-337, 2017.
- [16] H. A. T. Coral, P. Rosero, E.E. Ramírez, J.M. Gómez, D. Marulanda, J. Diseño, "Construcción y Control de un Simulador Sísmico Uniaxial Tele-Operable para Modelos Estructurales a Pequeña Escala. Ingeniería y Competitividad.", *Ingeniería y Competitividad*, vol 12, no. 2, p. 95 - 115 2010.
- [17] J. M. Reyes, "Diseño, prototipaje y caracterización de una mesa sísmica de 1 grado de libertad a escala," Tese de Mestrado, Universidade de Valladolid, 2017.
- [18] "Screw Assemblies". PDF. Bosch Rexroth, Available: <http://www.aapautomation.com/wp-content/uploads/2014/12/LM-Handbook.pdf>. [Accessed: Mar-2018].
- [19] F. G. Almeida and J. F. Carneiro, "Apontamentos de sistemas de controlo - Modelação de sistemas dinâmicos mecânicos e elétricos" 2018, FEUP.
- [20] M. Ramírez Neria, H. Sira Ramírez, A. L. Juárez, and A. R. Angeles, "Smith Predictor Based Generalized PI Control for a Class of Input Delayed Nonlinear Mechanical Systems," *European Control Conference*, 2013.
- [21] P. Abreu, "Apontamentos de sistemas eletromecânicos - Acetatos de motores eletricos" 2015, FEUP.
- [22] "High-Torque Stepper Motor PKP Series". PDF. Oriental Motor U. S. A. Available: https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2012-2013/A/PKP_brochure.pdf. Accessed: Mar-2018].
- [23] "PoStep 60 User Manual". PDF. PoStep. Available: https://www.poscope.com/wp-content/uploads/downloads/Motordrivers/Manuals/PoStep60_256_UM.pdf 2016. [Accessed: Mar-2018].
- [24] "Driver Motor L298". BOXEletrônica. Available: https://www.boxelectronica.com/pt/pesquisa?search_query=L298&submit_search=&controller=search&orderby=position&orderby=categories&orderway=desc&searchcateid=0. [Accessed: Aug-2018].
- [25] "DC Motors". PDF. NISCA. Available: http://ftn.canon/en/product/motor/Nisca_DC_Motor.pdf. [Accessed: Aug-2018].
- [26] "What is data acquisition". National Instruments. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>. [Accessed: Mar-2018].
- [27] "PCI-6221 Dispositivo de E/S multifuncionais". National Instrumens. Available: <http://www.ni.com/pt-pt/support/model.pci-6221.html>. [Accessed: Mar-2018].
- [28] "DEVICE SPECIFICATIONS NI 6221". PDF. National Instrumens. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375303c.pdf>. [Accessed: Mar-2018].
- [29] "NI SCB-68". National Instrumens, Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/1180>. [Accessed: Mar-2018].

- [30] "S-150 *series*".PDF. MEAN WELL. Available: <https://www.mouser.com/ds/2/260/s-150-spec-1179838.pdf>. [Accessed: Mar-2018].
- [31] "ADXL 103/203". PDF. Analog Devices. Available: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adx1103_203.pdf. [Accessed: Mar-2018].
- [32] "MEMS INERTIAL SENSOR: 3-axis - +/-2g/6g ultracompact linear accelerometer". PDF. STMicroelectronics. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00068498.pdf>. [Accessed: Mar-2018]
- [33] "PZ34 RECTILINEAR DISPLACEMENT TRANSDUCER WITH CYLINDRICAL CASE". PDF. GEFRA. Available: <https://www.gefran.com/it/download/3216/attachment/en>. [Accessed: Mar-2018].
- [34] "RC Low-pass Filter Design Tool". Okawa Electric Design. Available: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRtool.php>. [Accessed: Aug-2018].

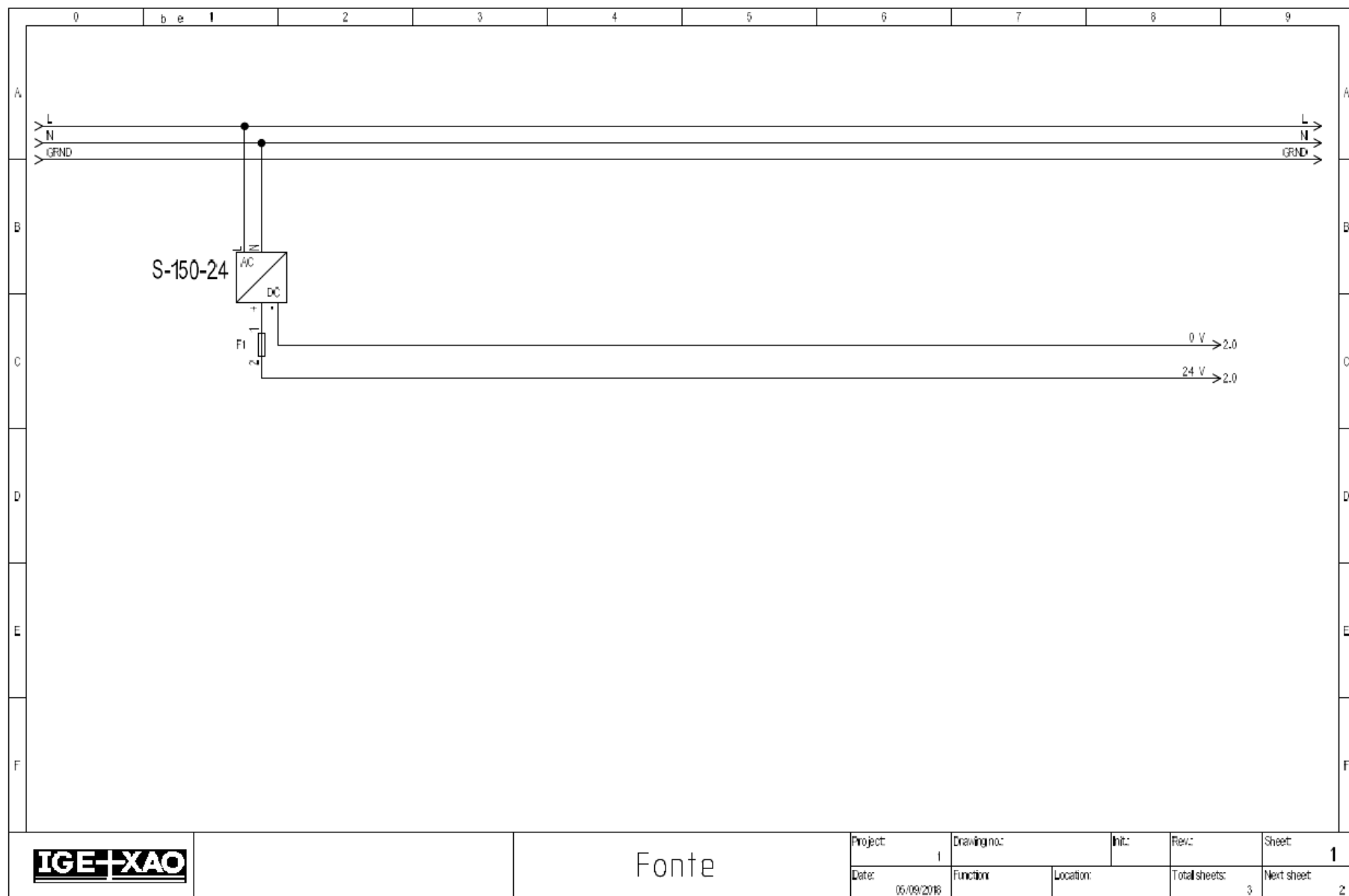
ANEXO A: Especificações da carruagem do fuso de esferas



Size	Part number	Mass	Hole pattern	Hex socket cap screw
$d_0 \times P \times D_w$		(kg)		ISO 4762
16 x 5R/L x 3	R1506 000 50	0.91	BB2	M8
16 x 10R x 3				
16 x 16R x 3				
20 x 5R/L x 3	R1506 100 50	1.18	BB2	M8
20 x 10R x 3				
20 x 20R x 3.5				

Size	(mm)															
	D ₁	D ₂	A	B	H	H ₁	H ₂	E ₁	E ₂	N	S	S ₁	T ₁	S ₂	T ₂	Clamping length L
d ₀ × P × D _w	H7			±0.01	±0.01											
16 x 5R/L x 3	28	38	50	35	24	48	10	50 ^{+0.1}	20 ^{+0.1}	20	8.4	M10	15	M5	10	37.0
16 x 10R x 3																
16 x 16R x 3																
20 x 5R/L x 3	36	47	55	37.5	28	56	10	55 ^{+0.1}	23 ^{+0.1}	22	8.4	M10	15	M6	11	45.0
20 x 10R x 3																
20 x 20R x 3.5																

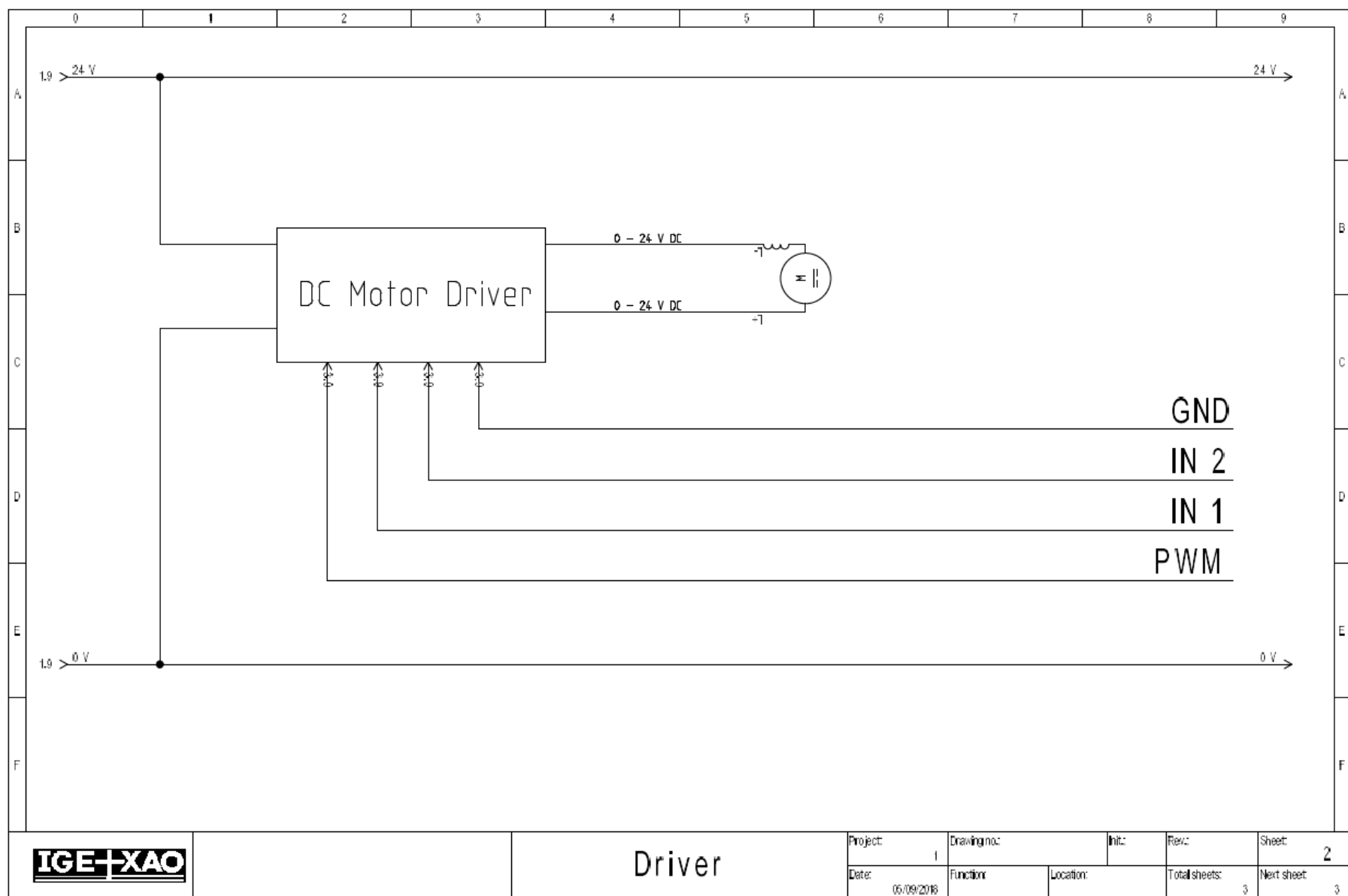
ANEXO B: Esquemas Eléctricos

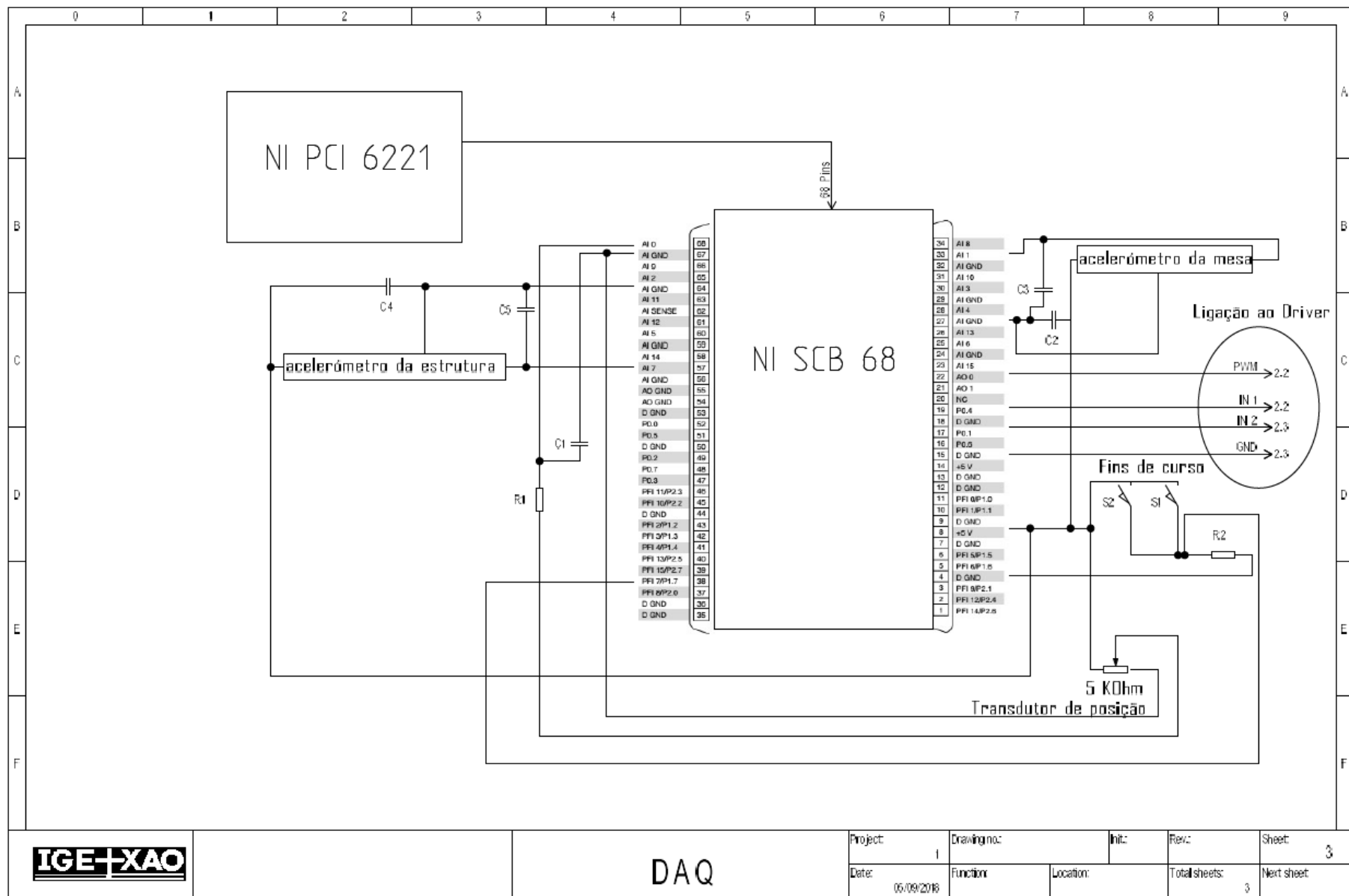


IGE+XAO

Fonte

Project:	Drawing no.:	Init.:	Rev.:	Sheet:
Date:	Function:	Location:	Total sheets:	Next sheet:
06/09/2018			3	2



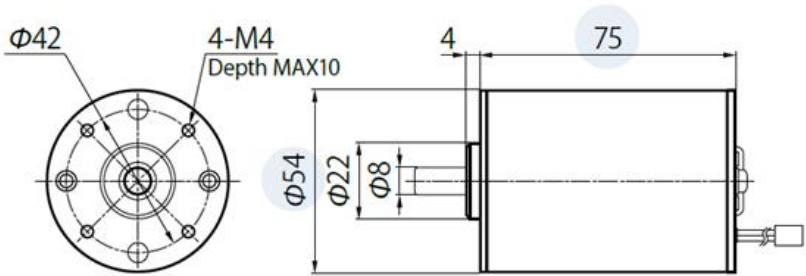


ANEXO C: Especificações do motor elétrico

ブラシモーター
NC5475



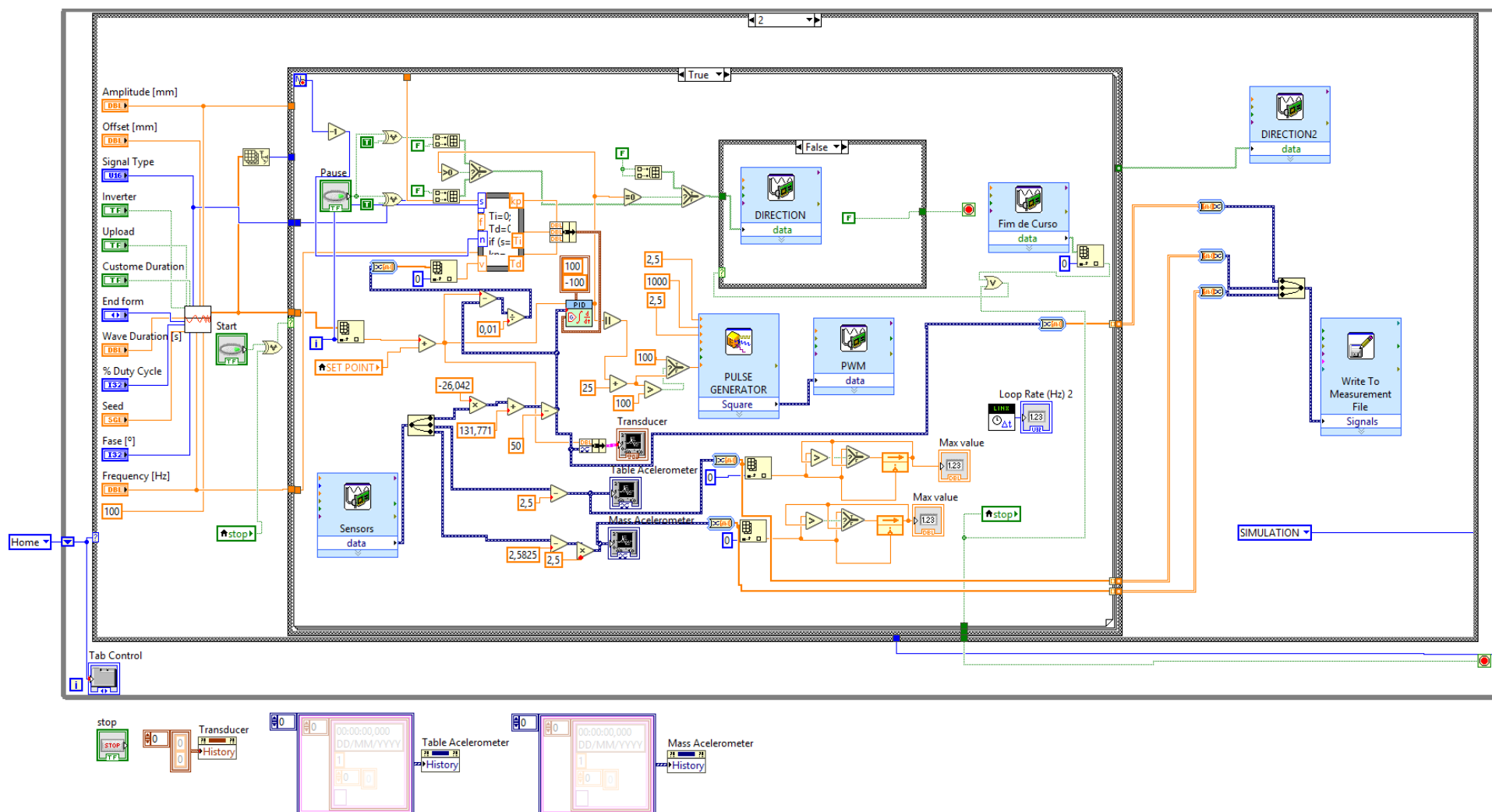
電圧 Voltage [V]	DC 24
質量 Weight [g]	700
軸受 Bearing	両側ベアリング Ball Bearing
永久磁石 Magnet	2 極 2 Pole



機種番 Model No.	最大効率時 at Maximum Efficiency					連続運転時 at Continuous Operation (at 50°C)	無負荷時 No Load		起動時 Starting	
	トルク Torque [mN・m]	回転数 Speed [rpm]	電流 Current [A]	出力 Output [W]	効率 Efficiency [%]	可能最大出力 Possible Max Output [W]	回転数 Speed [rpm]	電流 Current [A]	トルク Torque [mN・m]	電流 Current [A]
NC5475B	63.27	2891	1.123	19.15	71.1	20.5	3344	0.176	466.68	7.158

ANEXO D: Software LabVIEW

Aplicação de LabVIEW para controlo



Formula Node para o caso sem o offset de referência

```
Ti=0;
Td=0;

if (s==0 && a>=9 && a<=10 && f>=1 && f<2) {
kp=(-3*a-52)/10*f+(a+36)/20;
}
else if (s==0 && a>=8 && a<9 && f>=1 && f<2) {
kp=(-a-59)/20*f+(-3*(a-24)/20);
}
else if (s==0 && a>=7 && a<8 && f>=1 && f<2) {
kp=-3*(2*a-33)/20*f+12/5;
}
else if (s==0 && a>=6 && a<7 && f>=1 && f<2) {
kp=(-8*a-113)/20*f+3*(a+9)/20;
}
else if (s==0 && a>=5 && a<6 && f>=1 && f<2) {
kp=(-4*a-89)/20*f-(2*a-57)/20;
}
else if (s==0 && a>=4 && a<5 && f>=1 && f<2) {
kp=0.55*(a+1.2727)*f-1.45*(a-6.6207);
}
else if (s==0 && a>0 && a<4 && f>=1 && f<2) {
kp=29/10*f+19/5;
}

else if (s==0 && a>=9 && a<=10 && f>=2 && f<3) {
kp=(311*a-2544)/20*f-(633*a-5332)/20;
}
else if (s==0 && a>=8 && a<9 && f>=2 && f<3) {
kp=17*(a-6)/4*f-(35*a-242)/4;
}
else if (s==0 && a>=7 && a<8 && f>=2 && f<3) {
kp=(26*a-123)/10*f-(58*a-369)/10;
}
else if (s==0 && a>=6 && a<7 && f>=2 && f<3) {
kp=(73*a-393)/20*f-(159*a-1039)/20;
}
else if (s==0 && a>=5 && a<6 && f>=2 && f<3) {
kp=3*(17*a-27)/100*f-(152*a-1337)/100;
}
else if (s==0 && a>=4 && a<5 && f>=2 && f<3) {
kp=(67*a-248)/50*f-(303*a-2092)/100;
}
else if (s==0 && a>0 && a<4 && f>=2 && f<3) {
kp=2/5*f+44/5;
}

else if (s==0 && a>=9 && a<=10 && f>=3 && f<4) {
kp=(-1499*a-14490)/100*f+(5997*a-54970)/100;
}
else if (s==0 && a>=8 && a<9 && f>=3 && f<4) {
kp=(-901*a-9108)/100*f+(3103*a-28924)/100;
}
else if (s==0 && a>=7 && a<8 && f>=3 && f<4) {
kp=(8*a-45)*f-(22*a-135);
```

```

}
else if (s==0 && a>=6 && a<7 && f>=3 && f<4) {
kp=-(a-29)/2*f+(9*a-101)/2;
}
else if (s==0 && a>=5 && a<6 && f>=3 && f<4) {
kp=(249*a-344)/100*f-(373*a-1063)/50;
}
else if (s==0 && a>=5 && a<6 && f>=3 && f<4) {
kp=(249*a-344)/100*f-(373*a-1063)/50;
}
else if (s==0 && a>=4 && a<5 && f>=3 && f<4) {
kp=-(98*a-1391)/100*f+(393*a-3569)/100;
}
else if (s==0 && a>0 && a<4 && f>=3 && f<4) {
kp=999/100*f-1997/100;
}

else if (s==0 && a>=9 && a<=10 && f>=4 && f<=5) {
kp=20*f+(a-5010)/100;
}
else if (s==0 && a>=8 && a<9 && f>=4 && f<=5) {
kp=(251*a-1259)/50*f-(2509*a-17580)/100;
}
else if (s==0 && a>=7 && a<8 && f>=4 && f<=5) {
kp=-(999*a-9490)/100*f+(1249*a-10615)/25;
}
else if (s==0 && a>=6 && a<7 && f>=4 && f<=5) {
kp=-(753*a-7768)/100*f+(1631*a-15161)/50;
}
else if (s==0 && a>=5 && a<6 && f>=4 && f<=5) {
kp=-5*(3*a-31)/2*f+5*(13*a-121)/2;
}
else if (s==0 && a>=4 && a<5 && f>=4 && f<=5) {
kp=(1999*a-6995)/100*f-(1599*a-5995)/20;
}
else if (s==0 && a>0 && a<4 && f>=4 && f<=5) {
kp=1001/100*f-401/20;
}

else if (s==6 && i<n) {
kp=5.8;
}

else if (s==6 && i==n) {
kp=0;
}

else
kp=0;

```

Formula Node para o caso com o offset de referência

Ti=0;

Td=0;

if (s==0 && f>=1 && f<2) {

kp=19/10*f+6/10;

}

else if (s==0 && f>=2 && f<3) {

kp=151/10*f-258/10;

}

else if (s==0 && f>=3 && f<4) {

kp=1/2*f+18;

}

else if (s==0 && f>=4 && f<=5) {

kp=11*f-24;

}

else if (s==6 && i<n) {

kp=3.7;

}

else if (s==6 && i==n-1) {

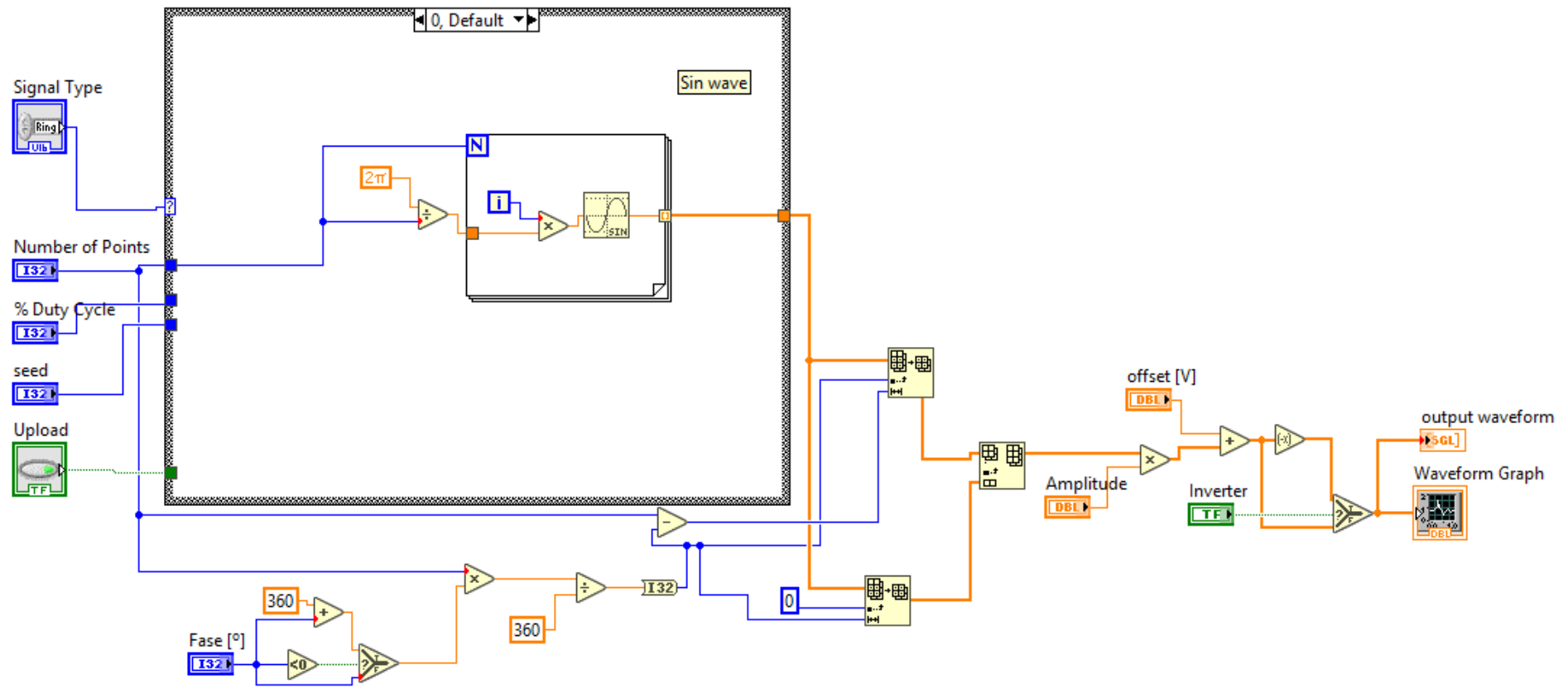
kp=0;

}

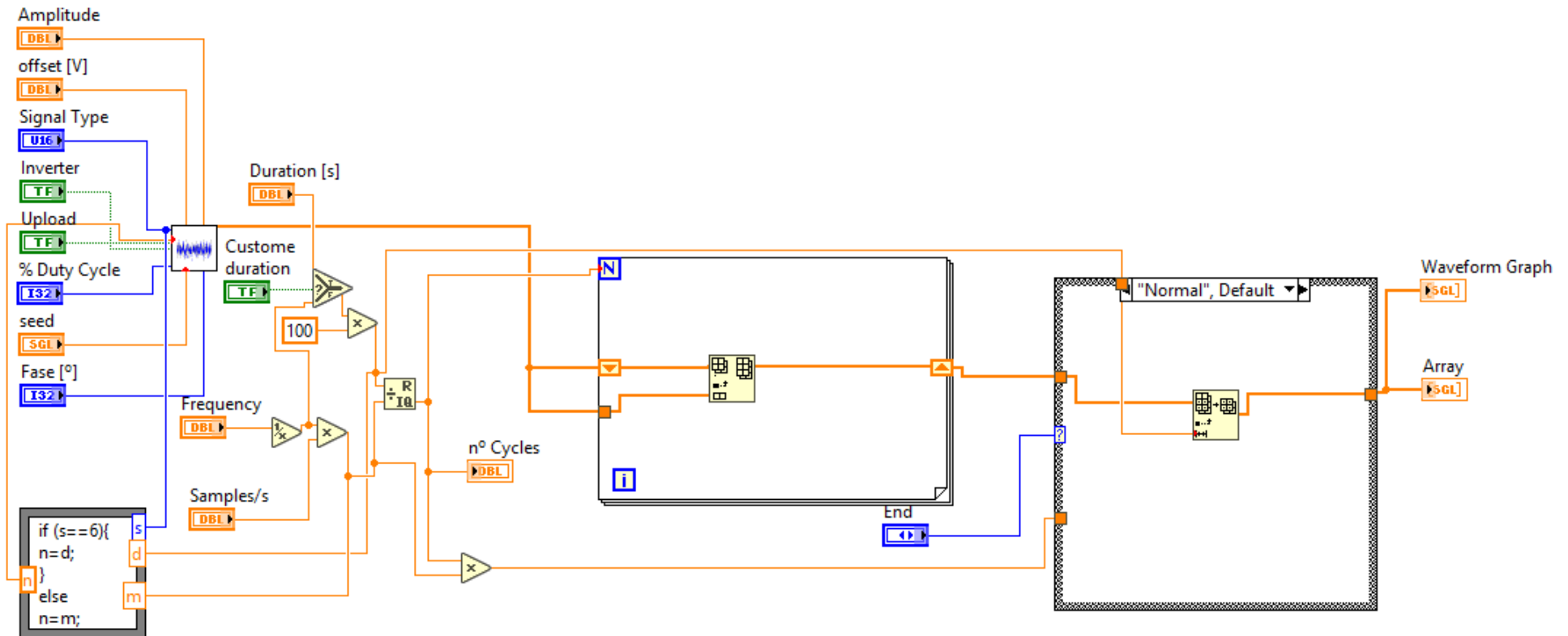
else

kp=0;

Aplicação de LabVIEW do gerador de funções



Aplicação de LabVIEW para repetição das ondas geradas



ANEXO E: Desenho de definição do suporte do modelo

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES
		TO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE
CHECK'D			
APPROV'D			
MFG			
QA			
TITLE		DWG NO.	
Peça de suporte da estrutura		A4	
MATERIAL		WEIGHT	
Plástico		SCALE	
SHEET 1 OF 1		SHEET 1 OF 1	
4	3	2	1

ANEXO F: Exercícios propostos

1. Na figura seguinte é apresentado um modelo simplificado de um sistema de 1 grau de liberdade, composto por uma viga de alumínio e uma massa.

Dados:

$$m_{bola} = 58,02 \text{ g}$$

$$\Phi_{bola} = 0,063 \text{ m}$$

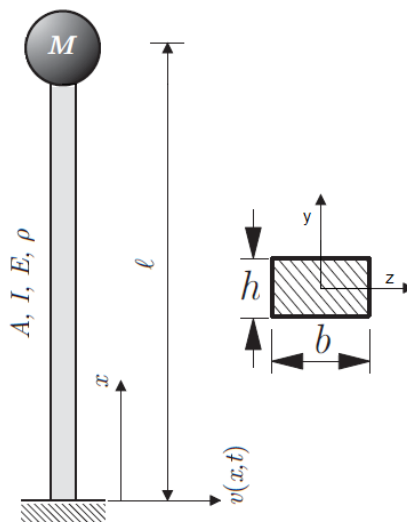
$$E = 69 \text{ GPa}$$

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$L = 0,722 \text{ m}$$

$$b = 0,015 \text{ m}$$

$$h = 0,002 \text{ m}$$



A partir dos dados fornecidos anteriormente, calcule:

- a. A rigidez da viga;
 - b. A frequência natural não amortecida do sistema.
2. Recorrendo aos valores obtidos da aceleração calcular:
 - a. O decremento logarítmico;
 - b. O coeficiente de amortecimento da estrutura;
 - c. A equação de movimento do sistema;
 - d. Tensão normal máxima que ocorre no pilar;
 - e. A frequência natural amortecida;
 - f. A frequência de ressonância.